

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC**

**PISOS EM SISTEMA LEVE DE MADEIRA SOB AÇÃO DE  
CARREGAMENTO MONOTÔNICO EM SEU PLANO.**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil.

**ALTEVIR CASTRO DOS SANTOS**

Florianópolis  
Abril/2005

“PISOS EM SISTEMA LEVE DE MADEIRA SOB AÇÃO DE  
CARREGAMENTO MONOTÔNICO EM SEU PLANO”

ALTEVIR CASTRO DOS SANTOS

Tese julgada adequada para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

---

Prof<sup>ª</sup> Dr. Henriette Lebre La Rovère, Ph.D. – Coordenadora do PPGEC

---

Prof. Dr.-Ing. Carlos Alberto Szücs – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Alfredo Petruski – UNIOESTE

---

Prof. Dr. Francisco Antônio Romero Gesualdo – UFU

---

Prof. Dr. Guilherme Corrêa Stamato - UNESP

---

Prof. Dr. Ivo José Padaratz, Ph.D. – ECV/UFSC

---

Prof<sup>ª</sup> Dr. Poliana Dias de Moraes – ECV/UFSC

*A minha esposa e filhos pelo  
amor e carinho, aos meus pais,  
pelo amor, orientação e exemplo.*

## AGRADECIMENTOS

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, pelos ensinamentos e apoio prestados durante a realização deste Trabalho.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná e a Universidade Federal de Santa Catarina por concederem condições para minha formação e infra-estrutura necessárias para realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Ao professor Carlos Alberto Szücs, pela orientação demonstrada através de sua amizade, ensinamentos e dinamismo.

Aos professores Félix Diaz Diaz, Ângela do Valle, Carolina Palermo Szücs, Ivo José Padaratz, Henriette Lebre La Rovere, Narbal Ataliba Marcellino, Roberto Caldas de Andrade Pinto, Roberto de Oliveira, Daniel Domingez Loriggio, Luis Alberto Gómez, Roberto Lamberts, Poliana Dias de Moraes e Marciano Maccarini pelos anos de convívio e companheirismo.

Aos amigos Gustavo Lacerda Dias, Rodrigo F. Tereso, André Luiz Lima, Joana Velloso, Carol Strutzel, Andréa M. Frazzon, Cherli Dominghini, William Pescador, Rafael Andrigheto, Renato Coelho Neto, Edi Assini Jr., Humberto Metello, Márcio Lara Pinto, Maria Fernanda e Demian pelo auxílio e coleguismo demonstrado durante todos os anos de nossa convivência.

À Batistella Indústria e Comércio Ltda, pela doação de toda madeira maciça empregada na pesquisa.

À Masisa do Brasil Ltda, pela doação das chapas de OSB necessárias para a realização deste trabalho.

À empresa CIM do Brasil - CARBIM, pela doação de todos os pregos pneumáticos empregados na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos.....	4
2 ESTRUTURAS LEVES DE MADEIRA.....	5
2.1 Sistema estrutural .....	12
3 DIAFRAGMAS DE MADEIRA.....	20
3.1 Ações verticais.....	20
3.2 Rigidez do diafragma em seu plano .....	22
3.2.1 Contribuição dos banzos para deflexão do diafragma.....	25
3.2.1.1 Contribuição devido à flexão nos banzos.....	26
3.2.1.2 Contribuição devido a existência de emendas nos banzos .....	26
3.2.2 Contribuição da alma.....	28
3.2.3 Contribuição devido ao deslizamento dos pregos .....	29
3.3 Efeito de aberturas.....	32
3.4 Condições de carregamento especiais .....	32
3.5 Critérios de dimensionamento .....	32
3.6 Modelagem numérica para diafragmas de piso .....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Ensaio preliminares - Caracterização do <i>Pinus sp.</i> .....	35
4.2 Ensaio preliminares - Caracterização do OSB ( <i>Oriented Strand Board</i> ) .....	35
4.2.1 Ensaio de flexão estática.....	36
4.2.2 Ensaio de cisalhamento .....	41
4.3 Estudo da ligação - Madeira/Prego/Chapa de OSB.....	44
4.3.1 Configuração dos corpos-de-prova.....	44
4.3.2 Procedimentos de ensaio .....	45

4.4	Confecção das vigas-I.....	46
4.5	Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso.....	49
4.5.1	Configuração dos diafragmas horizontais .....	50
4.5.2	Confecção dos protótipos de diafragmas horizontais de piso.....	52
4.5.3	Variáveis envolvidas na confecção dos protótipos.....	56
4.5.4	Instrumentação do ensaio dos protótipos .....	57
4.6	Modelo numérico.....	61
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1	Ensaio preliminares - Caracterização do Pinus sp. ....	63
5.2	Ensaio preliminares - Caracterização do OSB ( <i>Oriented Strand Board</i> ) .....	64
5.3	Estudo da ligação - Madeira/Prego/Chapa de OSB.....	66
5.4	Formulação para cálculo do deslizamento da ligação. ....	69
5.5	Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso.....	71
5.6	Modelo numérico.....	74
5.7	Modelo analítico .....	80
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	84
7	BIBLIOGRAFIA.....	87
7.1	Referências bibliográficas .....	87
7.2	Obras não referenciadas.....	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do sistema construtivo com estruturas leves de madeira .....	06
Figura 2 – Industrialização do sistema construtivo com estruturas leves de madeira.....	07
Figura 3 – Transporte e içamento de estruturas executadas fora do canteiro de obra.....	07
Figura 4 – Instalação do sistema elétrico e hidráulico. ....	08
Figura 5 – Isolamento térmico-acústico e sistema de calefação.....	09
Figura 6 – Revestimento externo de vinil.....	10
Figura 7 – Hipóteses de distribuição de esforços verticais.....	12
Figura 8 – Hipóteses de distribuição de esforços horizontais. ....	13
Figura 9 – Constituição básica da parede estrutural ( <i>shearwall</i> ).....	14
Figura 10 – Ação do vento nos painéis estruturados .....	15
Figura 11 – Distribuição de esforços nos painéis estruturados .....	16
Figura 12 – Analogia para dimensionamento de diafragma.....	17
Figura 13 – Fixação dos elementos de ossatura no banzo.....	18
Figura 14 – Dispositivo enrijecedores entre vigas leves. ....	18
Figura 15 – Montagem de diafragma horizontal de piso.....	19
Figura 16 - Analogia da viga <i>i</i> para diafragma horizontal.....	23
Figura 17 - Banzo de duplo montante para diafragma horizontal .....	23
Figura 18 – Emenda no banzo do diafragma horizontal.....	27
Figura 19 – Esforços cortante em diafragma horizontal.....	28
Figura 20 – Deslocamento “ $e_n$ ” devido ao deslizamento dos pregos.....	30
Figura 21 – Esquema do ensaio de flexão estática. ....	37
Figura 22 – Ensaio de flexão com orientação longitudinal .....	40
Figura 23 – Ensaio de flexão com orientação transversal .....	40
Figura 24 – Ensaio de flexão vertical .....	41
Figura 25 – Esquema do ensaio de cisalhamento. ....	42
Figura 26 – Ensaio de cisalhamento. ....	43
Figura 27 – Corpos de prova confeccionados com chapas de OSB de 18mm .....	45
Figura 28 – Esquema do dispositivo de ensaio proposto pela norma astm d-1761 (2000) e foto do dispositivo confeccionado para o ensaio .....	46
Figura 29 – Confeccção das vigas-I empregadas como elementos de ossatura .....	47

Figura 30 – Aplicação e distribuição do adesivo nas mesas.....	47
Figura 31 – Montagem e ajuste da viga-I com auxílio de gabarito. ....	48
Figura 32 – Fixação das mesas da viga-I com auxílio de pregadeira pneumática.....	48
Figura 33 – Protótipos sem dispositivos enrijecedores - configuração 1. ....	51
Figura 34 - Protótipos com dispositivos enrijecedores - configuração 2. ....	51
Figura 35 - Protótipos com dispositivos enrijecedores más sem a fixação das chapas de fechamento nos dispositivos enrijecedores - configuração 3 .....	51
Figura 36 – Representação da fixação das cantoneiras. ....	52
Figura 37– Fixação das vigas-I nos banzos através de cantoneira metálica.....	53
Figura 38 – Representação da fixação dos elementos enrijecedores nas vigas-I. ....	53
Figura 39 – Representação dos elementos enrijecedores nas vigas-I.....	54
Figura 40 – Detalhe da fixação das chapas de OSB nos enrijecedores e nas vigas-I.....	54
Figura 41 – Vista geral da parte inferior de diafragmas com enrijecedor .....	55
Figura 42 – Representação da fixação das vigas-I em diafragmas sem enrijecedor .....	55
Figura 43 – Representação da estrutura de contenção dos diafragmas horizontais de piso. ....	57
Figura 44 – Representação dos dispositivos rotativos da estrutura de contenção. ....	58
Figura 45 – Disposição das células de carga nos diafragmas horizontais de piso.....	59
Figura 46 – Sistema de aquisição de dados empregado no ensaio dos protótipos .....	60
Figura 47 – Disposição dos transdutores de deslocamento nos protótipos. ....	60
Figura 48 – Modelo numérico desenvolvido com malha de 100mm. ....	61
Figura 49 – Modelo numérico desenvolvido com malha de 205mm. ....	62
Figura 50 – Ruptura típica verificada no ensaio de flexão vertical.....	65
Figura 51 – Ruptura típica verificada nos ensaios de flexão transversal e longitudinal. ....	65
Figura 52 – Ruptura típica dos corpos-de-prova de cisalhamento ao longo da espessura. ....	66
Figura 53 – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção perpendicular das fibras do barrote. ....	67
Figura 54 – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção paralela das fibras do barrote.....	67
Figura 55 – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção perpendicular das fibras do barrote. ....	68
Figura 56 – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção paralela das fibras do barrote.....	69

Figura 57 – Análise de regressão para determinação do deslizamento de pregos anelados 2,7mmx70mm.....	70
Figura 58 – Resultados dos protótipos com configuração 1 aos ensaios à flexão.....	71
Figura 59 – Resultados dos protótipos com configurações 2 e 3 aos ensaios à flexão .....	72
Figura 60 – Arrancamento dos pregos lisos, observado ao término do ensaio de flexão.....	72
Figura 61 – Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão. ....	73
Figura 62 – Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão. ....	74
Figura 63 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 17x27 espaçados a cada 20,5 cm .....	76
Figura 64 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm. ....	77
Figura 65 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 41 cm. ....	77
Figura 66 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 3 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm .....	78
Figura 67 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm .....	78
Figura 68 – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 10 cm. ....	79
Figura 69 – Resultados analíticos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 .....	81
Figura 70 – Comparações entre resultados experimentais, numéricos do sap-2000 e do modelo analítico para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7x70 ....espaçados a cada 20,5cm. ....	82
Figura 71 – Resultados do sap-2000 e modelo analítico para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70, espaçados a cada 10 cm, 20,5 cm e 41 cm de forma uniforme.	83

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros variáveis para ensaio dos diafragmas horizontais de piso .....	56
<b>Tabela 2</b> – Parâmetros fixos para ensaio dos diafragmas horizontais de piso.....	56
<b>Tabela 3</b> – Número de protótipos ensaiados de acordo com os parâmetros investigados.....	57
<b>Tabela 4</b> – Resumo das propriedades da madeira de <i>Pinus sp</i> .....	63
<b>Tabela 5</b> – Resumo das propriedades das mesas de <i>Pinus sp</i> das vigas-I .....	64
<b>Tabela 6</b> – Resumo das propriedades das chapas de OSB de 18mm .....	64
<b>Tabela 7</b> – Valores para caracterização das ligações, com pregos 17x27, sob a forma de diagrama multilinear.....	75
<b>Tabela 8</b> – Valores para caracterização das ligações, com pregos 2,7x70, sob a forma de diagrama multilinear.....	75

## RESUMO

Este trabalho aborda uma nova perspectiva para construções em madeira, sob a ótica construtiva de sistemas com estruturas leves (*Lightweight wood-frame construction*), devido à sua consagrada aplicação internacional e forte viabilidade de utilização no Brasil. Apresenta ensaios realizados pela primeira vez no Brasil, trazendo uma contribuição inicial sobre o assunto, com subsídios para projeto e execução de diafragmas de piso com emprego de material nacional oriundo do manejo racional de florestas cultivadas. 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. Para atendimento deste propósito foram ensaiados protótipos em escala real (2,50 m x 5,00 m) com diferentes arranjos construtivos e avaliou-se a influência dos seguintes parâmetros: utilização de dispositivos enrijecedores entre vigas, que constituem a ossatura do diafragma horizontal; rigidez das ligações e o efeito do espaçamento entre pregos na rigidez do conjunto, composto de madeira e chapas de OSB – *Oriented Strand Board* nacional. Dos ensaios realizados conclui-se que o emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento do número de pregos de fixação no perímetro das chapas e este acréscimo é responsável pelo aumento da resistência e rigidez dos diafragmas.

**Palavras chave:** Estruturas em madeira, Diafragmas de madeira, Sistema plataforma, Edificações em madeira, Modelo numérico, Piso em OSB.

## ABSTRACT

This work is focused on lightweight wood-frame constructions, which are accepted worldwide and may be considered feasible for use in Brazil as well. It presents the results of experimental tests on floor diaphragms subjected to lateral loads. This is the first time this kind of tests are performed in Brazil. Thus, it brings up valuable information about this subject, giving technical information that may contribute for the design and construction of floor diaphragms employing local materials that come from planted forests. The main goal of this research is to evaluate the resistance and rigidity of wood light-frame floor diaphragms, when subjected to monotonic lateral forces acting in the plane of the floor. Full scale floor diaphragm specimens (2,50m x 5,00m) were tested with different constructive arrangements, and the influence of the following variables were examined : blocked vs. unblocked diaphragms, rigidity of the nailed joints between I-joists and sheathing ; and distance between nails around the perimeter of the OSB boards. The tests showed that the blocked floor diaphragms enable nailing the whole perimeter of the boards, thus increasing its resistance and rigidity.

**Keywords :** Timber structure, Wood Diaphragm, Platform frame, Wood frame construction, Finite element model, OSB Diaphragm.

## 1. INTRODUÇÃO

A situação habitacional no Brasil constitui-se em um dos mais graves problemas sociais de nossos dias. As tentativas de estimar o acréscimo necessário do atual estoque de domicílios para a superar o déficit de habitações, têm resultado em valores que vão desde 4 até 20 milhões de unidades, conforme a amplitude do critério adotado (GONÇALVES, 1998).

De acordo com dados da FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (2001), o Brasil tem um déficit de 6,56 milhões de casas que corresponde a 14,8% dos domicílios particulares existentes. Isto considerando os domicílios improvisados e os rústicos, denominados habitação precária; a coabitação familiar, que corresponde a mais de uma família morando no mesmo domicílio; os domicílios depreciados, domicílios construídos há mais de 50 anos e o ônus excessivo com aluguel, casas de famílias com renda mensal até três salários mínimos que gastam mais de 30% dessa renda com aluguel. A pesquisa chegou a um total de 20.190.986 pessoas, 11,7% da população, que não têm casa própria ou casa digna para morar. E, ao contrário do que se possa imaginar num primeiro momento, a maioria dessas pessoas não está concentrada somente nas regiões metropolitanas, mas também no meio rural e nas pequenas cidades do interior, principalmente na região Nordeste.

Outro fator agravante desta realidade é o desemprego, intensificado a partir da década de noventa com a reestruturação produtiva e abertura econômica que, entre outras causas, mudaram profundamente o mercado de trabalho brasileiro. Como conseqüência, as empresas passaram a empregar menos pessoas para produzir a mesma quantidade de bens e serviços, além de exigir trabalhadores mais qualificados. Segundo estudo baseado em números do próprio IBGE e do Ministério do Trabalho, de 1995 a 2000 o desemprego do Brasil cresceu 155%, ou seja, em cinco anos, boa parte da população brasileira perdeu o seu emprego.

De acordo com dados oficiais do Governo, divulgados em pesquisas do IBGE em maio de 2002, 7,8% da População Economicamente Ativa (PEA) estava desempregada. Isto corresponde a cerca de 7,5 milhões de brasileiros dos 96 milhões de pessoas que compõem a PEA no Brasil. Além disso, a cada ano, mais trabalhadores necessitam entrar no mercado de trabalho: por volta de 1,3 milhão de novos trabalhadores. É bom lembrar que o Governo, ao efetuar o cálculo do número de desempregados, leva em consideração somente os portadores de carteira profissional de trabalho, ficando fora da estatística, que calcula o índice de desemprego, os vários ramos da chamada "economia informal".

Considerando a enorme necessidade do país em gerar de moradias, o setor da construção civil desempenha importante papel como produtor de bens essenciais à sociedade e grande gerador de empregos. Com capacidade de absorção de expressivos contingentes de mão-de-obra,

especialmente de profissionais menos qualificados e socialmente mais dependentes, com grande sensibilidade às características regionais e sociais.

Diante dos atuais desafios que o Brasil tem que enfrentar para resolver o problema do desemprego e moradia, o setor madeireiro e a Indústria da construção civil podem contribuir com propostas que permitam aos governantes elaborarem Políticas Públicas de Desenvolvimento Sustentado que tenham viabilidade ecológica, sejam geradora de empregos e permitam reduzir o desequilíbrio social e o déficit habitacional no país. Neste trabalho apresenta-se uma nova perspectiva para construções em madeira, sob a ótica construtiva de sistemas com estruturas leves de madeira (*Lightweight wood-frame construction*), baseado na experiência internacional já consagrada e considerando as boas perspectivas para a utilização desta técnica no Brasil.

O sistema construtivo é amplamente utilizado em países como os Estados Unidos, Canadá, França, Japão, Austrália, entre outros, o qual viabiliza maior industrialização e padronização do processo construtivo. A padronização, realizada pela indústria, dos vários componentes utilizados neste tipo de construção, como: esquadrias, louças, ferragens, metais etc., possibilita uma extrema eficiência nas várias etapas de montagem. Todas as peças se encaixam adequadamente graças a um eficiente controle de qualidade, exigido em todos os segmentos envolvidos na construção. Tudo isto assegura uma interferência mínima durante o processo de montagem, permite o cumprimento rigoroso do cronograma da obra e reduz custos devido a uma maior rapidez nos prazos de execução com racionalização de mão-de-obra e menor desperdício de material.

Segundo CUREe (1998), uma pesquisa realizada em 1.364 lojas de construção pela Portland Cement Association em 1997, indicou que 90% de todas as residências construídas atualmente nos EUA são em sistema leve de madeira. Onde a fração total de estruturas de madeira existentes, encontra-se entre 80 a 90% em todas as regiões dos EUA, como por exemplo 89% em Memphis e Tennessee, 87% em Wichita e Kansas. Este tipo de construção é largamente usado para residências multifamiliares além de escolas, escritórios de pequeno e médio porte e lojas de varejo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

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, como propósito de estudar o potencial de construção de edificações com Sistema Leve de Madeira. Dentre as vantagens apresentadas por este processo construtivo, destacam-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, bem como as demais vantagens deste processo em comparação ao nosso sistema convencional, a saber: 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 na etapa das fundações; eliminação de algumas etapas da construção convencional; facilidade de manutenção e pouco desperdício de material.

Embora este 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, 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 Estados Unidos o dimensionamento é realizado com auxílio de tabelas, desenvolvidas a partir da padronização dos elementos construtivos que estão disponíveis no mercado local. Desta forma, grande parte da literatura disponível sobre o assunto não permite referenciar o projeto deste sistema construtivo para a realidade brasileira. O postulante do tema, observará também, muito poucos trabalhos internacionais publicadas sobre diafragmas de pisos e, a nível nacional, poderá verificar que este é o primeiro.

Portanto há necessidade de estudos teórico e experimental para evidenciar tais condicionantes, uma vez que, os atuais parâmetros empregados nas edificações em madeira no Brasil não apresenta uma relação direta com a técnica construtiva em questão. Buscando-se com este trabalho trazer subsídios técnicos-científicos e divulgação do assunto através de um levantamento bibliográfico sobre a metodologia empregada para projeto e execução destas edificações, além dos resultados obtidos com os ensaios experimentais e modelo numérico desenvolvidos durante a pesquisa.

### 1.3 OBJETIVOS

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. 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 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. Para atendimento do objetivo principal foram enfatizados os seguintes objetivos específicos:

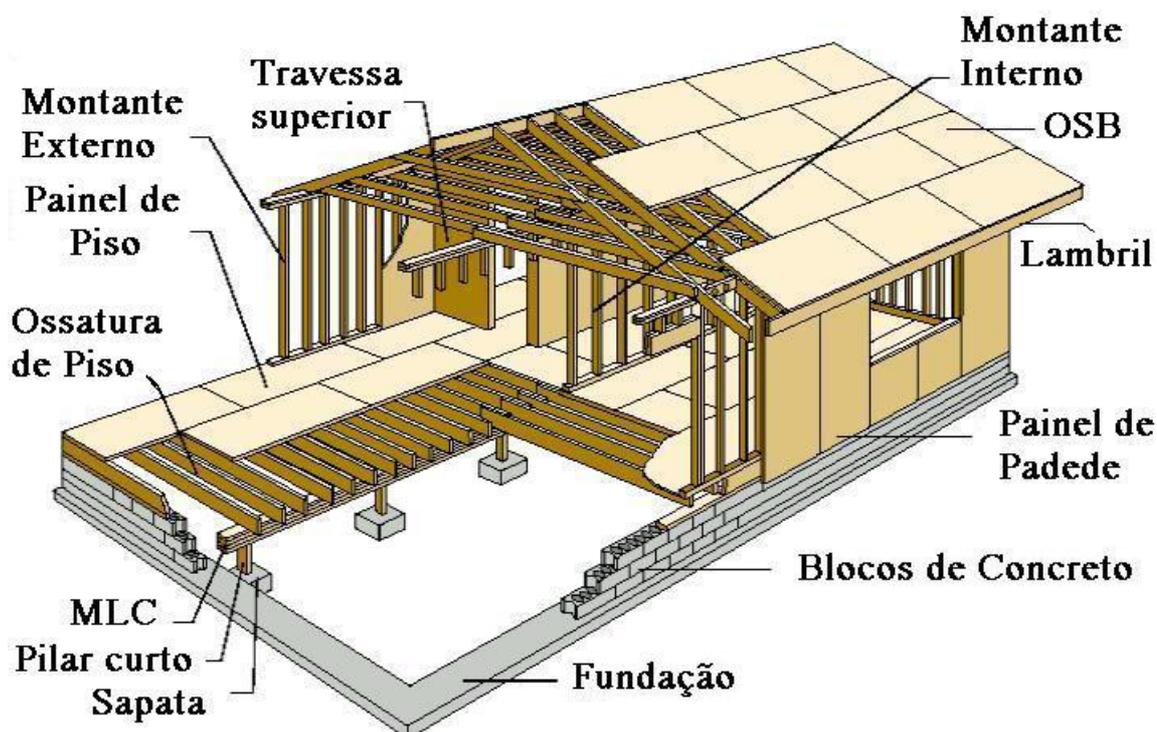
- Fundamentar, a partir da literatura internacional, princípios que regem o comportamento estrutural de diafragmas horizontais de piso usados em construções leves de madeira;
- Avaliar o potencial da madeira de *Pinus sp.* e a chapa de OSB – Oriented Strand Board, oriunda do manejo racional de florestas, para a confecção de diafragmas horizontais de pisos;
- Apresentar alternativa para confecção artesanal das vigas estruturais constituintes da ossatura dos diafragmas;
- Avaliar o comportamento das ligações entre elementos de madeira de *Pinus sp.* e a chapa de OSB – Oriented Strand Board, ligadas por conectores metálicos tipo prego, aplicados com ferramenta pneumática;
- Desenvolver modelos numéricos com auxílio de programas computacionais e estabelecer comparações entre resultados obtidos através de ensaios experimentais;
- Avaliação experimental de protótipos de diafragmas horizontais de piso, em comparação com modelos computacionais, quando submetido ao carregamento monotônico em seu plano;
- Avaliar formulações analíticas capazes de estimar valores de deslocamento transversal máximo no meio do vão, em diafragmas horizontais de piso, e estabelecer comparações entre resultados obtidos através de ensaios experimentais e de modelos numéricos computacionais.

## 2. ESTRUTURAS LEVES DE MADEIRA

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 destaca-se: boa resistência ao fogo; baixo custo da mão de obra decorrente da rapidez de execução; elevada resistência mecânica em relação ao peso reduzido; 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. Isto 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. Esta realidade tem levado a preferência dos consumidores, mesmo os de menores níveis econômicos, pelas 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 deste tipo de edificação que não deixa nada a desejar em relação às casas de alvenarias tradicionais.

Nestes países, o sistema construtivo com estruturas leves de madeira é bastante difundido. Esta técnica, exemplificada na Figura 1, utiliza basicamente painéis estruturados com montantes de madeira de pequenas dimensões na seção transversal, geralmente pouco espaçadas, formando um quadro sobre o qual é colocado um fechamento de chapas de madeira reconstituída e/ou gesso acartonado, apresentando considerável economia de tempo, além da praticidade na execução e manutenção das instalações elétricas e hidráulicas.



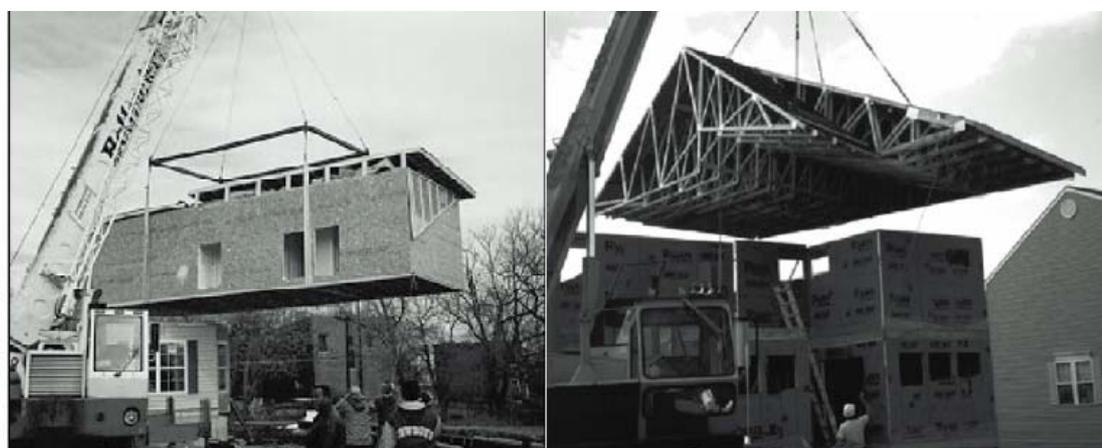
**Figura 1** – Representação do sistema construtivo com estruturas leves de madeira.  
**Fonte:** APA - The Engineered Wood Association (1997).

Um dos fatores responsáveis pelo sucesso deste sistema nos Estados Unidos e Canadá, é a maior rapidez na execução, quando comparado aos praticados no Brasil, pois até mesmo pelas condições climáticas extremas e adversas desenvolveu-se uma maior otimização. Geralmente, os painéis e elementos estruturais, entre os quais estruturas pré-fabricadas de telhado, chegam parcialmente montados à obra em peças isoladas que pesam até 40 kgf, o que permite serem manuseadas facilmente por duas pessoas, conforme ilustrado na Figura 2. Dependendo do nível de pré-montagem, das dimensões e complexidade da edificação é possível executar a estrutura do prédio, desde as fundações, num prazo bastante curto em relação ao das construções convencionais. Este prazo pode variar de alguns dias a poucas semanas.



**Figura 2** – Industrialização do sistema construtivo com estruturas leves de madeira  
**Fonte:** PATH (2002).

Montagem de estruturas executada inteiramente fora do canteiro de obra, como demonstra a Figura 3, requer um cuidadoso projeto de instalações, uma vez que estes componentes já chegam ao campo incorporados ao painel estruturado. Além disso, devido à presença das instalações no interior do painel, tornam-se necessários procedimentos especiais de transporte, içamento e manuseio.



**Figura 3** – Transporte e Içamento de Estruturas Executadas fora do Canteiro de Obra.  
**Fonte:** PATH (1998).

Durante a construção, os fios, eletrodutos e canos necessários para os serviços de luz, telefone e água são alojados facilmente nos espaços entre os montantes das paredes e entre as vigas nos pisos e cobertura. Estes elementos são colocados quando a parede se acha ainda aberta e o acesso a todos estes espaços se encontra desimpedido, conforme mostra a Figura 4. Este sistema oferece grande facilidade para manutenção das instalações e substituição das peças, bastando retirar a chapa de vedação para se ter acesso fácil às instalações e proceder aos reparos

sem necessidade de quebrar revestimentos e alvenarias. Ao final do reparo basta recolocar o painel na sua posição original para concluir o serviço.



**Figura 4** – Instalação do sistema elétrico e hidráulico.  
**Fonte:** SOUTHERN PINE COUNCIL (1999).

O sistema hidro-sanitário é contido, também, nestes espaços internos das paredes com tubos de PVC colados, com diâmetros que variam entre 38 e 150 mm. Para distribuição de água em geral são utilizadas tubulações de cobre (usualmente de 19 mm ou 13 mm de diâmetro). Estes tubos têm conexões soldadas, são resistentes à corrosão e produzem um sistema bastante estável, no entanto, atualmente também se utiliza o sistema de tubos plásticos flexíveis. Estes tubos são colocados de modo contínuo, como mangueiras, sem necessidade do uso de conexões para mudança de direção, o que reduz significativamente a mão-de-obra necessária para a sua instalação.

Devido à utilização de peças leves de madeira para elaboração dos painéis estruturados, o sistema apresenta o inconveniente de ser suscetível à transmissão de ruído, onde normalmente são utilizados isolamentos acústicos estrategicamente colocados nos espaços internos das paredes, pisos e forro da cobertura. Quando necessário, após a realização das instalações elétricas, telefônicas e hidráulicas é facilmente realizado com a colocação de lã de rocha, com manta de polietileno ou poliuretano expandido e posterior fechamento das paredes como mostra a Figura 5. O aquecimento interno é usualmente suprido por aquecedores localizados no porão e

os seus dutos, embora maiores do que as outras instalações, podem ser acomodadas da mesma maneira nas paredes e pisos.



**Figura 5** – Isolamento Térmico-acústico e Sistema de Calefação.

**Fonte:** Anton TenWolde (2001).

Amalizando-se a necessidade de adaptação do sistema para a realidade brasileira, a utilização de isolamento mostrada na Figura 5, só se justificaria em algumas regiões do sul do país, onde as temperaturas são mais baixas. Podendo ser facilmente realizado o isolamento térmico com lã de rocha ou lã de vidro e o uso da manta de polietileno, colocado no espaço entre os montantes.

O fechamento externo da edificação é realizado com utilização de chapas de madeira reconstituída, que agem em conjunto com os montantes verticais, formando um painel estruturado responsável pela transferência das cargas verticais e horizontais para as fundações. Além desta função, serve também para receber o revestimento de proteção da superfície externa do prédio, fator indispensável para a realidade brasileira, tendo em vista os elevados níveis de precipitação observados em grande parte do país. O propósito deste revestimento é obter uma superfície durável e resistente às ações externas como vento e chuva.

A Figura 6 exibe o tipo de revestimento mais utilizado atualmente nos Estados Unidos e Canadá é o perfilado de vinil ou alumínio e revestimento com argamassa. O revestimento com argamassa requer um mínimo de manutenção, é bastante durável e normalmente aplicado em uma camada com 20mm de espessura. Estes sistemas requerem menos manutenção do que o revestimento com tábuas superpostas utilizadas no passado. Segundo Einsfeld et al (1998), o

revestimento com lâminas de vinil já vem sendo utilizado com sucesso no Brasil, assegurando a impermeabilidade da parede externa.



**Figura 6** – Revestimento Externo de Vinil  
**Fonte:** Anton TenWolde (2001).

Considerando as características gerais do processo construtivo, o mesmo apresenta vantagens em relação ao sistema tradicional, podendo-se citar a eliminação de algumas das etapas como aplicação do chapisco, do emboço e da massa corrida nas paredes internas. O emprego de materiais como gesso acartonado confere à parede uma superfície idêntica à massa corrida e aceita bem qualquer tipo de pintura além da facilidade de colagem de materiais como vinil, fórmica, madeira e papel de parede.

Algumas desvantagens do sistema estão associadas às condições climáticas. No Brasil, é comum o ataque das madeiras por cupins, no entanto, devido à presença da resina e preservativos empregados na confecção das placas de OSB (Oriented Strand Board) este inseto evita o ataque das peças. Todavia, cuidados com relação ao ataque destes xilófagos também devem ser tomados

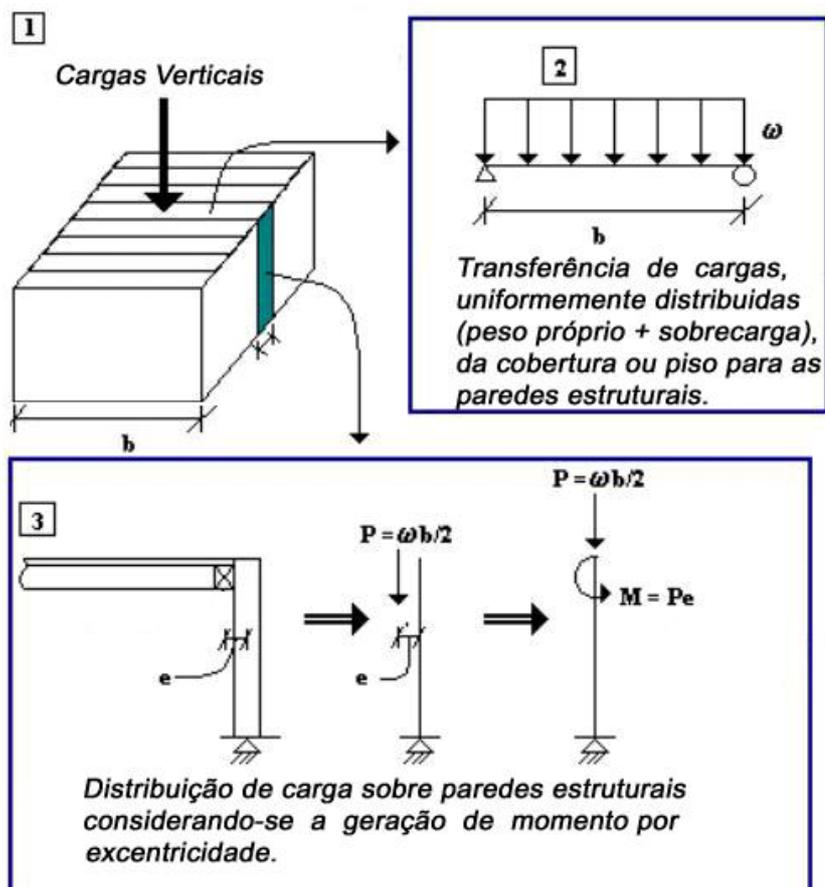
nas partes do sistema normalmente feitos de madeira serrada maciça, como montantes, travessas e vigas de ossatura dos diafragmas horizontais.

Outro importante fator que deve ser considerado para a realidade brasileira refere-se à ação do fogo em edificação de madeira. No Brasil, assume-se que a madeira não possa ter um desempenho satisfatório sob a ação do fogo pelo fato de ser um material combustível. Esta suposição é incorreta. Uma reação adequada ao fogo pode ser proporcionada através de um projeto que combine diferentes materiais como especificado nos códigos de construção. Os painéis estruturados podem ser feitos de modo a resistir à ação do fogo por mais de duas horas. De acordo com os códigos norte-americanos, a segurança dos ocupantes da edificação e dos combatentes do fogo está em primeiro lugar. Os principais objetivos na proteção ao fogo são os seguintes: manter a estabilidade da estrutura sob as condições do incêndio, prover proteção contra a propagação do fogo e, manter meios seguros de evacuação do prédio, (EINSFELD e PACHECO, 2000).

Um conceito fundamental é que o desempenho da edificação sob a ação do fogo não está associado às propriedades dos materiais utilizados individualmente, mas sim à maneira como estes materiais são combinados entre si na construção. Neste sistema construtivo, o fechamento das paredes interiores da edificação é feito com placas de gesso que, sendo apropriadamente aplicadas e por suas propriedades incombustíveis, servem de barreira à propagação do fogo para os componentes de madeira da estrutura. Diferentes detalhes na construção produzem sistemas com diferentes graus de resistência ao fogo. Estes sistemas são testados em fornos especialmente projetados, onde o grau de resistência ao fogo é atribuído de acordo com o seu desempenho.

## **2.1 Sistema Estrutural**

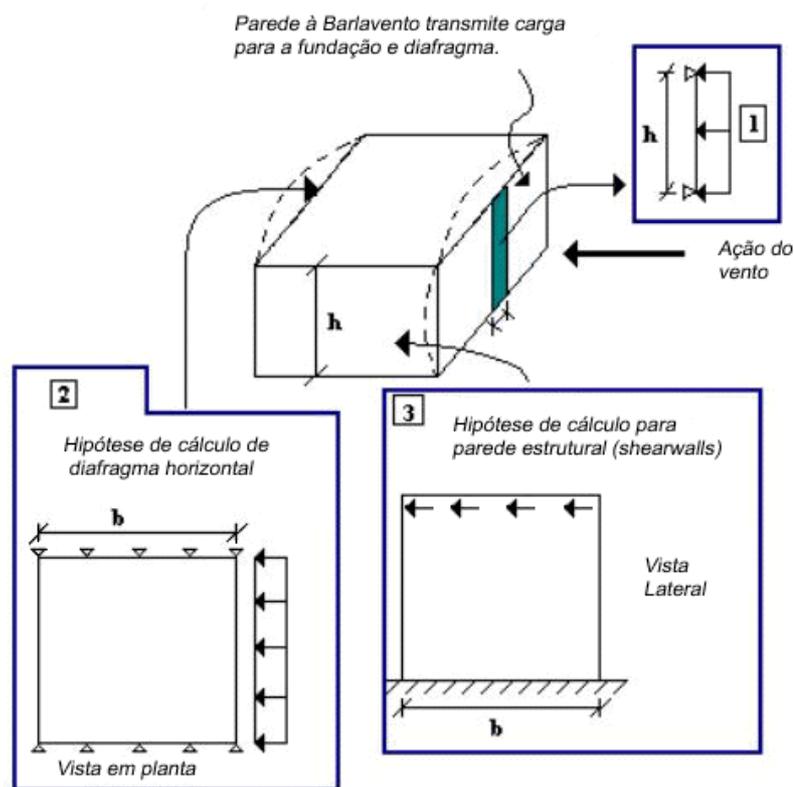
No funcionamento estrutural deste sistema construtivo ocorre a ação de forças distribuídas como representado nas Figuras 7 e 8, para a qual deve-se levar em conta as relações de equilíbrio dos elementos, particularmente, as ligações entre seus vários componentes, de modo a assegurar a integridade estrutural do edifício como um todo. Para estruturas simples, as cargas gravitacionais são transferidas ao solo por um sistema simplesmente apoiado em que as paredes recebem carregamento axial em seu próprio plano por transferência de carregamentos normais no sistema de telhado ou piso. No entanto, devido a excentricidades das solicitações, podem existir efeitos de momento e conseqüente tendência de flambagem (Figura 7).



**Figura 7** – Hipóteses de distribuição de esforços verticais.

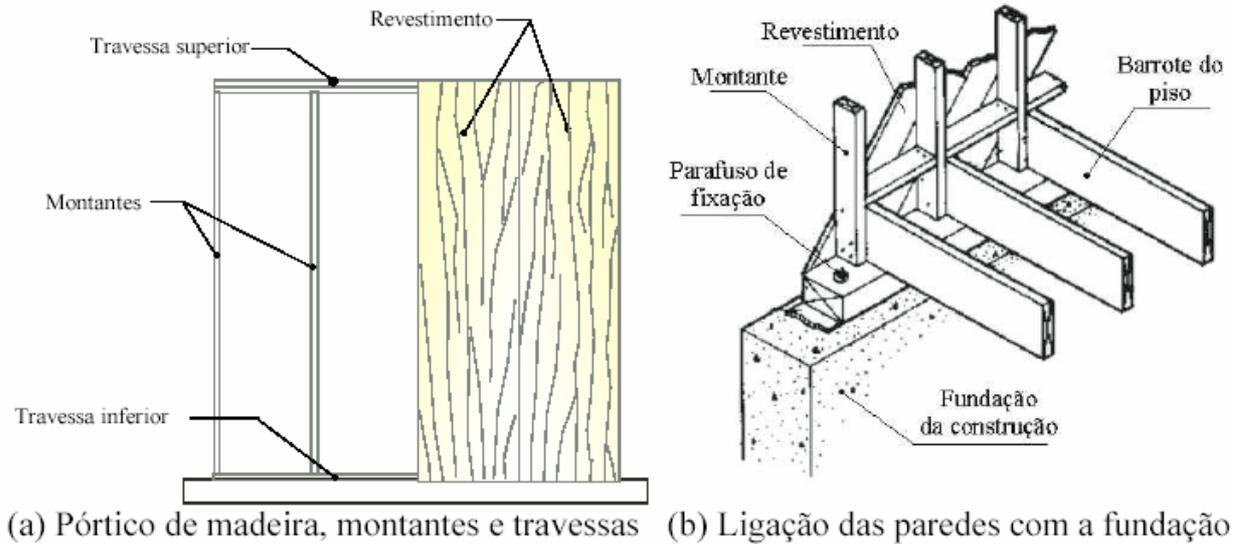
**Fonte:** Northern Arizona University (2000).

Os edifícios do tipo caixa, quando submetidos aos esforços laterais de ação do vento, empregam diafragmas horizontais especialmente projetados e cuidadosamente conectados às paredes estruturais, assegurando a estabilidade lateral e transferência apropriada da solicitação horizontal à fundação. O trajeto básico da força lateral pode ser visto na Figura 8, itens 1, 2 e 3.



**Figura 8** – Hipóteses de distribuição de esforços horizontais.  
**Fonte:** Northern Arizona University (2000).

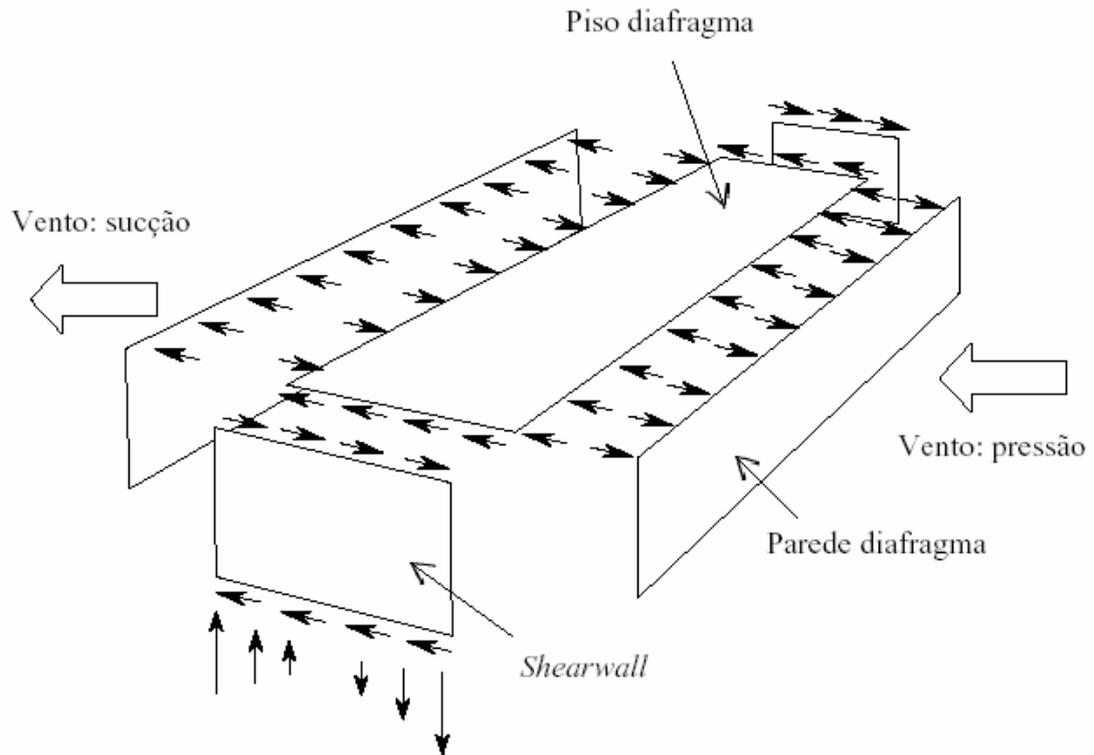
O sistema é formado basicamente por painéis estruturados de paredes e de piso. As paredes portantes, conforme ilustrado na Figura 9, são confeccionadas a partir de montantes verticais que possuem, geralmente, uma seção transversal de 38 mm de espessura e profundidade determinada pela espessura do isolamento térmico, na maioria das vezes de 140 mm. As paredes internas não necessitam deste tipo de isolamento e, por isso, a 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 fechamento são fixadas aos montantes através de pregos espaçados adequadamente de modo a prevenir a flambagem destes elementos estruturais (EINSFELD e PACHECO, 2000).



**Figura 9** – Constituição Básica da Parede Estrutural (*Shearwall*).  
**Fonte:** VELOSO, L.A.C.M. (2002).

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 no seu plano. O fechamento interno das paredes externas, bem como das duas faces das paredes internas, podem ser realizados 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 deste material é para proteção contra incêndio, além de permitir que se obtenha um acabamento de melhor qualidade nas superfícies internas.

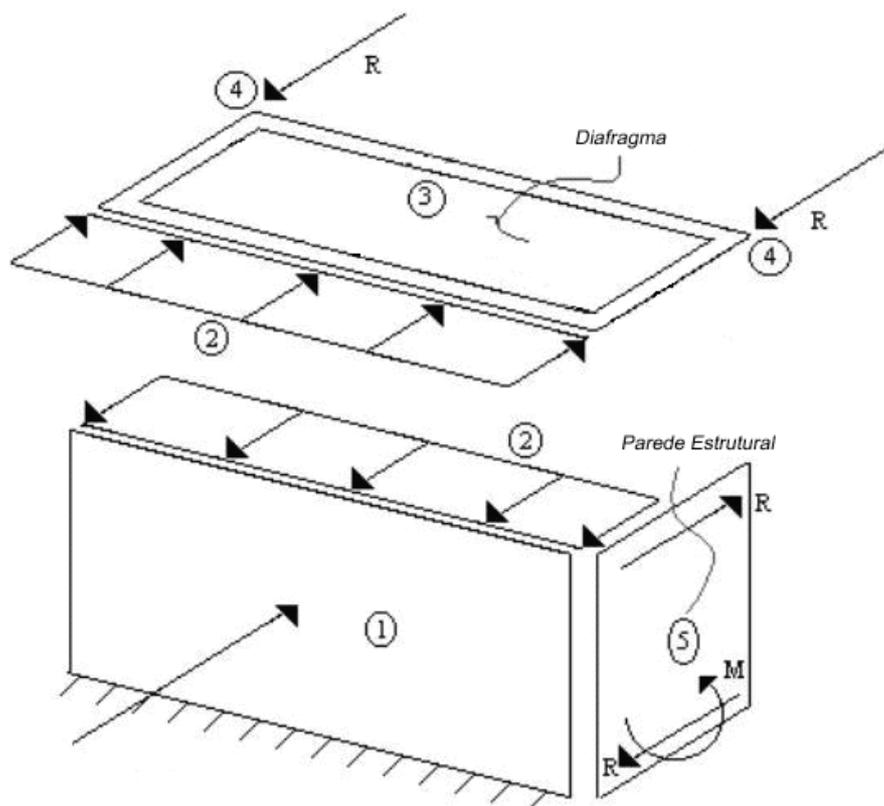
Este sistema é bastante estável e rígido, pois resiste de modo extremamente eficiente à ação de eventuais solicitações horizontais, como o efeito do vento. A pressão devida ao vento atua nas superfícies de fechamento da edificação e é distribuída para os montantes correspondentes nos painéis estruturados. As reações horizontais necessárias para equilibrar os montantes, transformam-se em cargas 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. Estas cargas são levadas às fundações através destes diafragmas verticais colocados nos vários níveis da edificação, conforme esquema representativo mostrado na Figura 10.



**Figura 10** – Ação do vento nos painéis estruturados  
**Fonte:** EINSFELD e PACHECO (2000).

Para projetar elementos tais como diafragmas de piso e paredes diafragma, é importante compreender o trajeto realizado pelas solicitações laterais através do plano de uma estrutura. A Figura 11 fornece uma descrição do comportamento básico de um edifício simples sob ação de um carregamento aplicado na parede lateral. Consulte os elementos numerados correspondentes na figura.

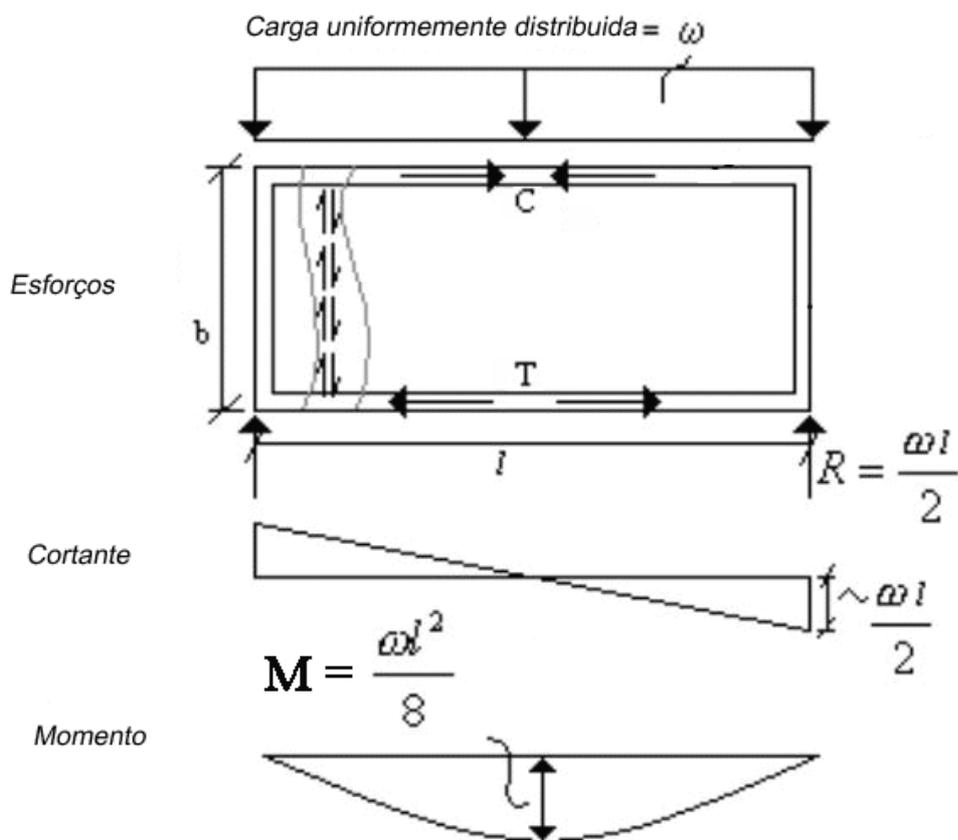
1. A solicitação, decorrente da ação do vento, é aplicada sobre a parede diafragma com transmissão de esforços ao diafragma de piso e à fundação através de paredes estruturais (*shearwalls*). O termo *shearwall* é utilizado para as paredes portantes solicitadas por esforços de cisalhamento no seu próprio plano, enquanto o termo diafragma é utilizado para os painéis que suportam carregamento na direção normal ao seu plano e transfere estes esforços para as paredes do tipo *shearwall*.
2. O diafragma horizontal e a fundação suportam a parede e desenvolvem conseqüentemente as reações no plano horizontal para equilíbrio do sistema.
3. Diafragma de piso é essencialmente uma laje com ossatura de elementos leves de viga, suportado por paredes estruturais.
4. No diafragma de piso, as solicitações, decorrentes das paredes estruturais (*shearwalls*), geram esforços reativos. O diafragma resiste às cargas geradas no próprio plano trabalhando como uma grande viga horizontal.
5. As paredes estruturais, quando corretamente projetadas, resistirão à transmissão de esforços do diafragma e realizará transferência de carga, e possível momento, à fundação.



**Figura 11** – Distribuição de esforços nos painéis estruturados  
**Fonte:** Northern Arizona University (2000).

As paredes estruturais, responsáveis pela transmissão dos esforços verticais e horizontais à fundação, quando solicitadas pelos esforços horizontais, atuarão como elementos estruturais planos cujo mecanismo resistente principal se dá por cisalhamento. No caso das edificações residenciais de madeira, esses elementos transmitem o cisalhamento atuante em seu plano para as demais partes da estrutura, realizando o contraventamento do conjunto e garantindo a estabilidade estrutural.

A Figura 12 mostra o funcionamento de sistemas de assoalho ou de telhado quando projetados para funcionar como diafragmas horizontais em estruturas típicas de madeira. Na vista de planta, o sistema pode ser descrito essencialmente por um feixe de finos barrotes de madeira ou vigas I (*I-Joist*) com mesas de madeira e alma em OSB (Oriented Strand Board), apoiado nas extremidades pelas paredes estruturais com comportamento análogo ao de uma grande viga simplesmente apoiada, uniformemente carregada.



**Figura 12** – Analogia para dimensionamento de diafragma.  
**Fonte:** Northern Arizona University (2000).

Segundo Martinez e Martitegui (1996), o diafragma resiste aos esforços de flexão através dos elementos do perímetro conhecidos como banzos (*Chord*). As forças de natureza axiais no banzo são resultantes do momento interno do diafragma e poderá ser calculada a partir da dimensão "b" de braço de alavanca [ $C = T = M/b$ ].

Os banzos dos diafragmas horizontais, apresentados na Figura 13, são normalmente projetados para resistirem, sozinhos, aos esforços de flexão, negligenciando-se a contribuição da alma e elementos enrijecedores, normalmente realizados através de curtos elementos de madeira serrada que promovem o travamento entre as vigas de ossatura do diafragma.



**Figura 13** – Fixação dos elementos de ossatura no banzo.  
**Fonte:** APA - The Engineered Wood Association (2000).

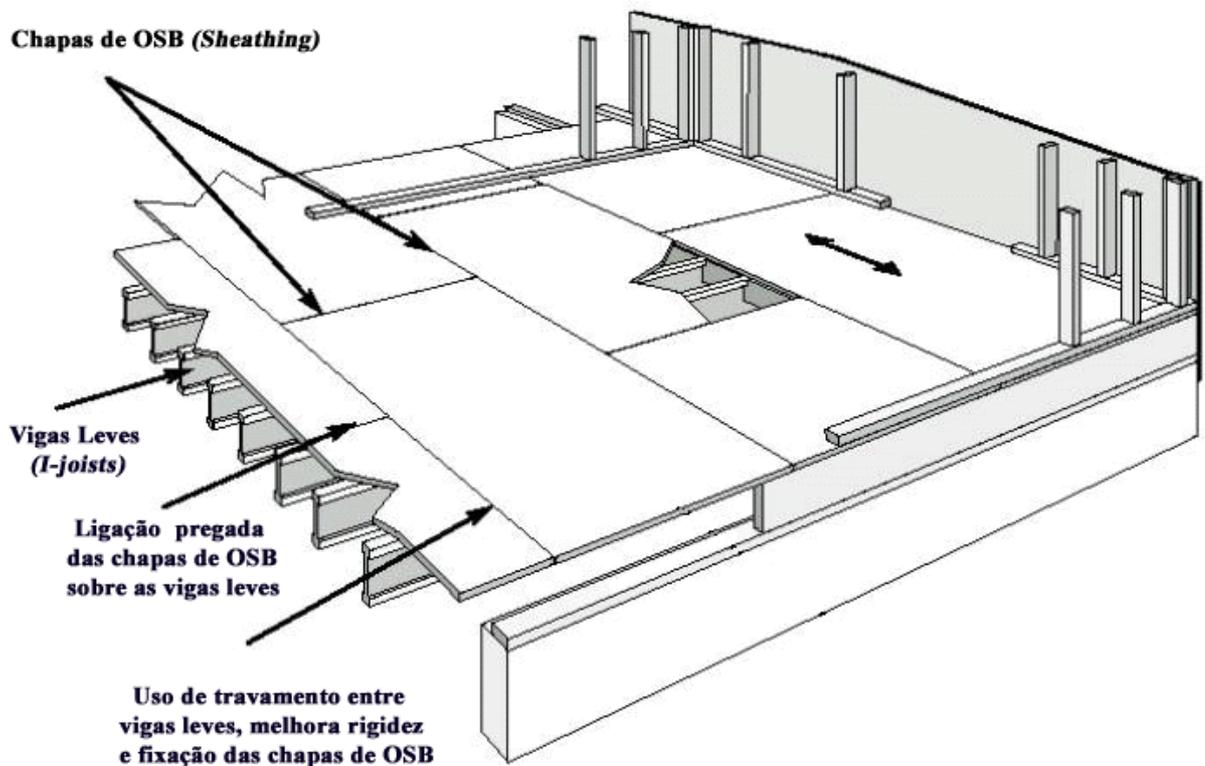
A presença dos elementos enrijecedores, exibidos na Figura 14, permite uma melhor vinculação das chapas de fechamento em OSB (*sheathing*), utilizadas como contra-piso, uma vez que facilita sua fixação através de ligações pregadas em todas as bordas do painel. A utilização destes dispositivos confere aos diafragmas (*Blocked Diaphragm*) maior rigidez quando comparados aos sistemas que não utilizam elementos enrijecedores (*Unblocked Diaphragm*).



**Figura 14** – Dispositivo enrijecedores entre vigas leves.  
**Fonte:** Southern Pine Council (1999).

Os diafragmas em madeira são os componentes mais importantes utilizados em edificações construídas em sistemas leves, garantindo sua resistência às solicitações laterais decorrentes da ação de vento ou abalos sísmicos. Diafragmas horizontais de madeira, conforme ilustrado na Figura 15, são construídos considerando a ação conjunta de três componentes básicos:

- Chapas de piso e contra-piso, tipicamente em madeira compensada ou placa de OSB - Oriented Strand Board (*sheathing*);
- Membros do quadro de madeira ou ossatura, normalmente vigas de madeira serrada ou perfil I com alma em OSB (Oriented Strand Board) e mesas em madeira maciça ou LVL – Laminated Veneer Lumber (*Joists*); e
- Conectores, normalmente pregos ou grampos, para união dos membros do quadro e, principalmente, às chapas de fechamento.



**Figura 15** – Esquema representativo da montagem de diafragma horizontal de piso.

**Fonte:** PFS Research Foundation (2000).

### 3. DIAFRAGMAS DE MADEIRA

#### 3.1 Ações Verticais

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 tábuas corridas 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 reconstituída têm substituído o piso de tábuas quase que completamente. CINTRAFOR News (1998), avalia que em 1995 o mercado de painéis estruturais nos Estados Unidos estava distribuído em: 45,5% de OSB (Oriented Strand Board), 44% de madeira compensada nacional e 10,5% de madeira compensada ocidental. Destacando-se que, desde 1980, o OSB (Oriented Strand Board) vem apresentando custos menores do que a madeira compensada em espessura equivalente.

Nesse país, diafragmas horizontais de pisos em madeira foram projetados por muito tempo, considerando os elementos de viga da ossatura agindo independentemente, com propriedades semelhantes as das vigas simples. Assumindo-se que o fechamento de piso (*sheathing*) apresenta só a função de transferir cargas aos elementos de ossatura (*joists*), sem considerar a contribuição decorrente das diferentes propriedades mecânicas dos materiais que compõe o piso.

Esta suposição desconsiderava os fatores de interação entre os materiais, que são capazes de afetar a rigidez e deformação da estrutura final do 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 estrutural.

A resistência e rigidez de um diafragma de piso são influenciadas pela interação entre os elementos da ossatura com as chapas de fechamento de piso, o que passou a ser objeto de investigação de muitos pesquisadores. Testes executados por Polensek et al. (1972), citado por Sherwood e Moody (1989), que testou 44 diafragmas de pisos e verificou aumentos de rigidez na ordem de 15 a 104%, ressalta 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 fechamento do piso em minimizar as diferenças entre deflexões das vigas da ossatura, quando submetido a cargas uniformes. Além da 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 pisos compostos por vigas pré-fabricadas de madeira.

A National Forest Products Association criou uma tabela de classificação para vigas de ossatura (NFPA 1977) que é citada frequentemente para orientação na seleção destes elementos. As vigas da ossatura ainda são projetadas para assimilar as cargas, desconsiderando-se a contribuição das chapas de fechamento do piso. Entretanto, as tabelas assumem um pouco o efeito da redistribuição da carga, permitindo um aumento de carga de 15% em relação à deformação de projeto e o dobro, quando os elementos repetitivos estão separados não mais que 0,6 m.

Em sistemas leves de madeira, as principais teorias para dimensionamento de diafragmas de piso sob ação de cargas verticais, diferenciando seu comportamento da teoria de vigas simples 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 fechamento com os elementos da ossatura é similar ao da composição de uma viga T. A chapa de fechamento 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 fechamento com as vigas da ossatura é realizada através 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 e dificulta a análise.

(2) Redistribuição de Esforços – As chapas de fechamento executam uma segunda função importante redistribuindo a carga entre os elementos de viga da ossatura. As chapas de fechamento agem como uma placa estrutural que atravessa continuamente sob os vários elementos de viga, reduzindo as diferentes deflexões individuais dos seus elementos, decorrentes da variabilidade de suas propriedades mecânicas. As chapas de fechamento propiciam maior enrijecimento na direção perpendicular ao eixo dos elementos de viga, quanto maior for o efeito de redistribuição de esforços e menor for a variação na deflexão das vigas de ossatura.

A ação composta é maximizada quando a rigidez das chapas de fechamento, agindo como mesa, é alta e a distância entre aberturas é grande. Esta observação é válida para chapas de fechamento dispostas com o eixo longo paralelo às vigas da ossatura e constituídas por chapas de materiais ortotrópicos convencionais, como madeira compensada.

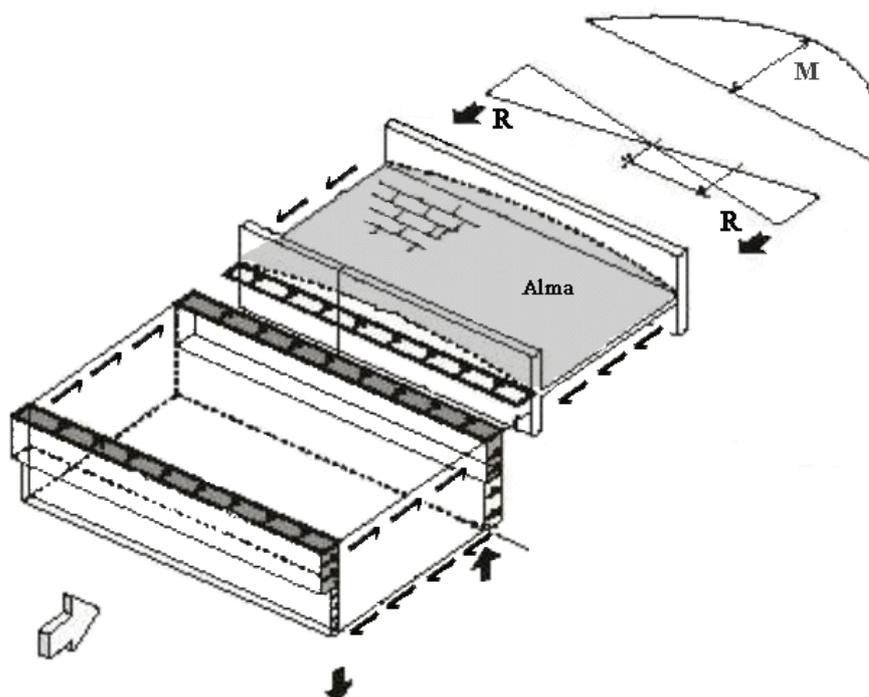
A redistribuição de esforços e cargas são aumentadas com o incremento da rigidez dos elementos da ossatura e fechamento. A observação é válida para chapas de fechamento disposta com o eixo longo cruzando as vigas da ossatura.

A ação composta e a redistribuição de esforços acontecem simultaneamente porque eles dependem do mesmo elemento estrutural, as chapas de fechamento de piso. 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 isto em conta, especificando materiais e considerando novas práticas de construção.

### **3.2 – Rigidez do diafragma em seu plano**

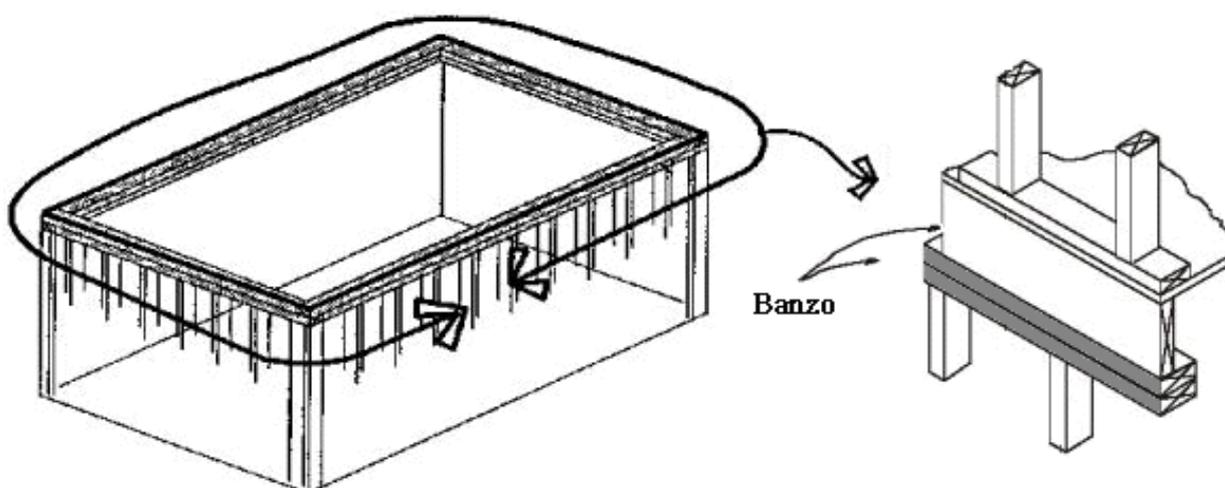
Várias teorias analíticas têm sido empregadas para descrever o comportamento de diafragmas horizontais de madeira sob ação de carregamento lateral, entre elas, a analogia da viga tem se mostrado mais apropriada para diafragmas construídos com chapas de madeira reconstituída. Este procedimento de analogia de viga foi substanciado através de ensaios de laboratório, conforme representação esquemática mostrada na Figura 16.

O projeto de diafragmas horizontais em sistemas leves de madeira, segundo esta teoria, dimensiona os painéis de fechamento para agirem como "alma" e os elementos do perímetro como "banzo" (chord), assumindo-se que os banzos resistem às solicitações normais à seção transversais e a alma resiste aos esforços de cisalhamento no plano do diafragma. O momento induz um binário de esforços axiais que é resistido pelos banzos e o pequeno momento observado nos banzos é ignorado.



**Figura 16** – Analogia da viga I para diafragma horizontal.  
**Fonte:** Illinois Emergency Management Agency (2000).

Construtivamente os banzos do diafragma são constituídos por um duplo montante de madeira da ossatura da parede estrutural (Figura 17) ou uma peça contínua de madeira ou perfil de aço, fixados na face da alvenaria, quando utilizados com sistemas em alvenaria estrutural.



**Figura 17** – Banzo de duplo montante para diafragma horizontal.  
**Fonte:** Illinois Emergency Management Agency (2000).

A alma do diafragma é representada por chapas de fechamento, normalmente de madeira compensada ou OSB – *Oriented Strand Board*. A conexão das chapas de fechamento aos elementos da ossatura é, normalmente, realizada através de pregos e/ou parafusos e são os responsáveis pela transferência de esforços de flexão para os banzos. O enrijecimento oferecido através da ligação dos painéis de fechamento aos componentes estruturais da ossatura reflete diretamente a rigidez da alma e do diafragma como um todo.

A resposta da estrutura de um edifício às forças de ação do vento ou cargas dinâmicas, induzidas por terremotos, depende diretamente da duração da ação sobre a estrutura. Sua duração será intimamente relacionada para determinação das características de deformação do diafragma (constante da mola). A determinação da rigidez do diafragma permite calcular a distribuição das forças laterais para os vários componentes verticais do edifício, no qual o diafragma é considerado apoiado de forma contínua.

Segundo a *ASCE Task Committee on Drift Control* (1988), citada pela AWC (1996), nos Estados Unidos da América a verificação do deslocamento lateral de edificações em madeira é feita, principalmente, devido à ação sísmica e de vento. O limite de deflexão comumente empregado para projetos de edificações é da ordem de 1/600 a 1/400 da altura do edifício.

A deflexão em diafragmas de madeira ( $\Delta$ ) ocorre devido às ações combinadas de esforços de flexão nos banzos ( $\Delta_b$ ), esforços de cisalhamento na alma ( $\Delta_s$ ), deslizamento dos pregos ( $\Delta_n$ ) e deslizamento das emendas nos banzos ( $\Delta_{SS}$ ):

$$\Delta = \Delta_b + \Delta_s + \Delta_n + \Delta_{SS} \quad (1.a)$$

O deslocamento transversal máximo, no meio do vão, em diafragmas construídos com fechamento de chapas de madeira reconstituída pode ser determinada pela fórmula desenvolvida pela *American Plywood Association-APA* e apresentada no Apêndice A, do ATC-7 (1981) - "Construção de Diafragma de Madeira Compensada". Segundo Skaggs e Martin (2004), esta fórmula é ainda hoje utilizada para o cálculo da deflexão de diafragmas retangulares sob ação de cargas distribuídas, com espaçamento uniforme entre pregos para fixação das chapas de fechamento e confeccionados com emprego de elementos enrijecedores. Segundo Bower (1974), a correlação entre os valores da deflexão teórica para a deflexão experimental dos diafragmas dada por esta expressão matemática é satisfatória.

$$\Delta = \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{96 \cdot EAb} + \frac{v \cdot L}{4 \cdot Gt} + 0,0006Le_n + \frac{\sum \Delta_c x_s}{2b} \quad (1.b)$$

em que :

$\Delta$  = Deflexão no centro do diafragma, mm;

$\nu$  = cisalhamento unitário máximo devido às cargas de projeto, ( $\nu = V/b$ ), N/mm;

$V$  = cisalhamento máximo devido às cargas de projeto, N;

$L$  = comprimento do diafragma, mm;

$b$  = largura do diafragma, mm;

$E$  = Módulo de elasticidade do material do banzo do diafragma, N/mm<sup>2</sup>;

$A$  = área da seção do banzo do diafragma, mm<sup>2</sup>;

$G$  = módulo de rigidez das chapas de fechamento, N/mm<sup>2</sup>;

$t$  = espessura efetiva da chapa, mm;

$e_n$  = deformação de um prego para uma determinada carga, mm;

$x_s$  = distância da emenda do banzo ao apoio, mm;

$\Delta_c$  = deslizamento individual da emenda do banzo, mm.

Bower (1974), apresenta tabelas para valores de  $e_n$  remetendo ao *Uniform Building Code* as citações para valores de  $G$  e  $t$ .

### 3.2.1 – Contribuição dos banzos para deflexão do diafragma

A contribuição dos banzos para a deflexão do diafragma apresentada na fórmula está baseada na analogia de viga. Entretanto, é negligenciada a contribuição da alma resistindo à flexão (critério conservador) e a contribuição do banzo calculada pela fórmula é maior em relação ao que de fato acontece. Há contribuição de dois componentes devido às tensões observadas no banzo: (i) porção devido aos esforços de flexão no banzo,  $\Delta_b = \frac{5 \cdot \nu \cdot L^3}{96 \cdot EAb}$  e (ii)

porção devido deslizamento das emendas do banzo,  $\Delta_{ss} = \frac{\sum \Delta_c x_s}{2b}$  apresentada no primeiro e

quarto termo da fórmula.

### 3.2.1.1 – Contribuição devida à flexão nos banzos

Para aplicabilidade da analogia da viga mestra, assume-se que a alma não resiste aos esforços de flexão e a contribuição da deflexão do banzo ocorre devido às mudanças do comprimento de seus componentes, decorrente das tensões neles atuantes. A fórmula habitual para o cálculo da deflexão em uma viga sob ação de uma carga uniforme é modificada na expressão apresentada pela *American Plywood Association-APA*, em relação as unidades da largura e do comprimento do diafragma, expressos em milímetros, mantidas as áreas dos banzos em milímetro quadrado e a deflexão expressa em milímetros.

A contribuição devida à flexão,  $\Delta_b$ , representado no primeiro termo da equação (1) é dada por:

$$\Delta_b = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot EI} \quad (2)$$

Fazendo:  $wL/2 = V$  e  $V/b = v$  (N/mm) temos  $w = 2v b/L$

$$I = 2 \cdot A \cdot (b/2)^2 = 2 \cdot A \cdot b^2 / 2I$$

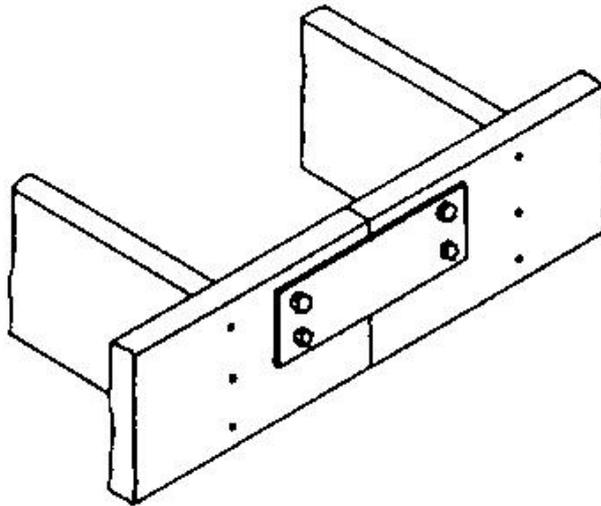
Substituindo essas expressões na equação (2) e procedendo as devidas simplificações, obtém-se:

$$\Delta_b = \frac{5 \cdot (2 \cdot v \cdot b/L) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot A \cdot b^2 / 2}$$

$$\Delta_b = \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{96 \cdot EAb} \quad (3)$$

### 3.2.1.2 – Contribuição devida a existência de emendas nos banzos

Na Figura 18 está ilustrado uma forma de emenda nos banzos, a qual deve ser dimensionada para resistir às solicitações de projeto, sendo que o comprimento do banzo na maioria dos diafragmas ditará a necessidade de emendas. As emendas, quando necessárias, devem ser localizadas longe da posição de momento máximo, sempre que possível. O deslizamento observado em um banzo de madeira com emendas é decorrente do embutimento dos conectores (pregos ou parafusos) na madeira, observado tanto no elemento principal quanto em suas talas.



**Figura 18** – Emenda no banzo do diafragma horizontal.  
**Fonte:** Kamiya (1990).

O deslizamento da emenda e magnitude do deslocamento do banzo estão relacionadas diretamente às tensões nos conectores. A mudança no comprimento do banzo provoca rotação do diafragma nos apoios devido sua deflexão no vão.

A rotação final do diafragma no plano é proporcional à mudança do comprimento do banzo devido ao deslizamento da emenda. Assumido-se que a mudança na rotação do diafragma em relação ao apoio é proporcional à distância do apoio até a emenda comparada ao comprimento total, no caso da emenda ser no meio do vão, então o ângulo de rotação,  $\theta$ , pode ser calculado como:

$$\theta = \frac{\Delta_c x_s}{L \cdot b} \quad \text{onde:} \quad \Delta_c = \text{deslizamento individual da emenda do banzo.}$$

$$x_s = \text{distância da emenda do banzo ao apoio.}$$

O deslocamento em qualquer ponto é dada pelo produto do ângulo de rotação pela distância do apoio, para o ponto no qual a deflexão é desejada. Então, como o deslocamento no eixo central normalmente é requerida, a distância é igual a  $L/2$ . Assim, a deflexão no eixo central devido ao deslizamento da emenda,  $\Delta_{ss}$ , para o banzo com uma emenda é dado por:

$$\Delta_{ss} = \frac{L}{2 \cdot \theta} = \frac{L \cdot \Delta_c x_s}{2 \cdot L \cdot b}$$

$$\Delta_{ss} = \frac{\Delta_c x_s}{2b}$$

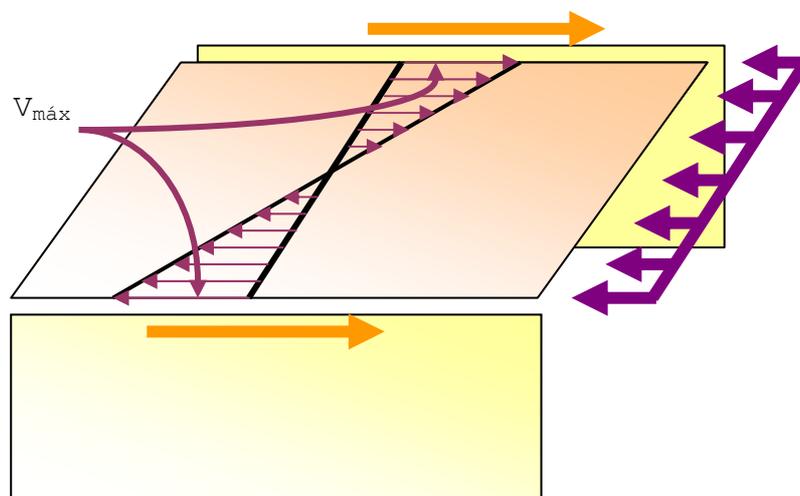
Este é o deslocamento ocorrido no banzo devido ao deslizamento de uma emenda. Para avaliação da deflexão total do banzo deve-se considerar a adição das diversas ligações:

$$\Delta_{ss} = \frac{\sum \Delta_c x_s}{2b} \quad (4)$$

### 3.2.2 - Contribuição da alma

As forças aplicadas ao diafragma são normalmente uniformes ao longo do seu comprimento. A condição de cisalhamento crítica para diafragmas sem aberturas acontece na região dos apoios, e esta ditará a densidade de pregos e a espessura das chapas de fechamento que o diafragma deverá empregar. Sob estas condições, os esforços de cisalhamento decrescem de um máximo nos apoios até zerar no meio do vão, o que permitiria, teoricamente, reduzir a espessura da alma. Por motivos construtivos, a espessura das chapas de fechamento não é variada e o ajuste é feito no espaçamento de pregos ao longo destas extremidades contínuas, que podem ser aumentadas quando a tensão de cisalhamento no diafragma diminui ao limite da tensão admissível.

O dimensionamento de diafragmas horizontais de madeira, no que diz respeito à transmissão das tensões de cisalhamento, é semelhante ao dimensionamento de almas de vigas, como mostra a Figura 19. A resistência dos diafragmas aos esforços de cisalhamento no plano, geralmente está limitada à resistência da ligação entre chapas de fechamento e elementos de ossatura.



**Figura 19** – Esforços cortante em diafragma horizontal.  
**Fonte:** American Wood Council (2002).

A fórmula apresentada para cálculo da deflexão em diafragmas de madeira é organizada para diafragmas que têm a mesma densidade de pregos ao longo das extremidades de seus painéis, onde ajustes deverão ser feitos para corrigir o espaçamento variável.

A contribuição dos esforços de cisalhamento para o cálculo da deflexão de diafragmas de madeira compensada é determinada pelo segundo termo da expressão:  $\Delta_s = \frac{v \cdot L}{4 \cdot G \cdot t}$ . Este termo assume uma distribuição uniforme do cisalhamento e dá ênfase para largura total da alma, uma vez que a contribuição da relação largura-comprimento para o cálculo é significativamente pequena. Diafragmas com fechamento de chapas de madeira têm relações largura-comprimento de pequena magnitude, em geral, é de 1:3 para diafragmas desbloqueados e 1:4 para diafragmas bloqueados.

A contribuição da alma para o cálculo da deflexão de diafragmas com chapas de fechamento de madeira compensada é determinada empiricamente através de ensaios experimentais com desconsideração do primeiro e último termo da equação (1). A deflexão devido ao cisalhamento da alma pode ser derivada pelo princípio dos trabalhos virtuais ou métodos de conservação de energia, resultando na seguinte expressão:

$$\Delta_s = \frac{W \cdot L^2}{8 \cdot G \cdot A_{alma}} \quad \text{onde:} \quad A_{alma} = \text{área da alma} = t \cdot b \quad \text{e} \quad W = \frac{2 \cdot v \cdot b}{L}$$

Substituindo essas expressões na equação anterior, obtém-se:

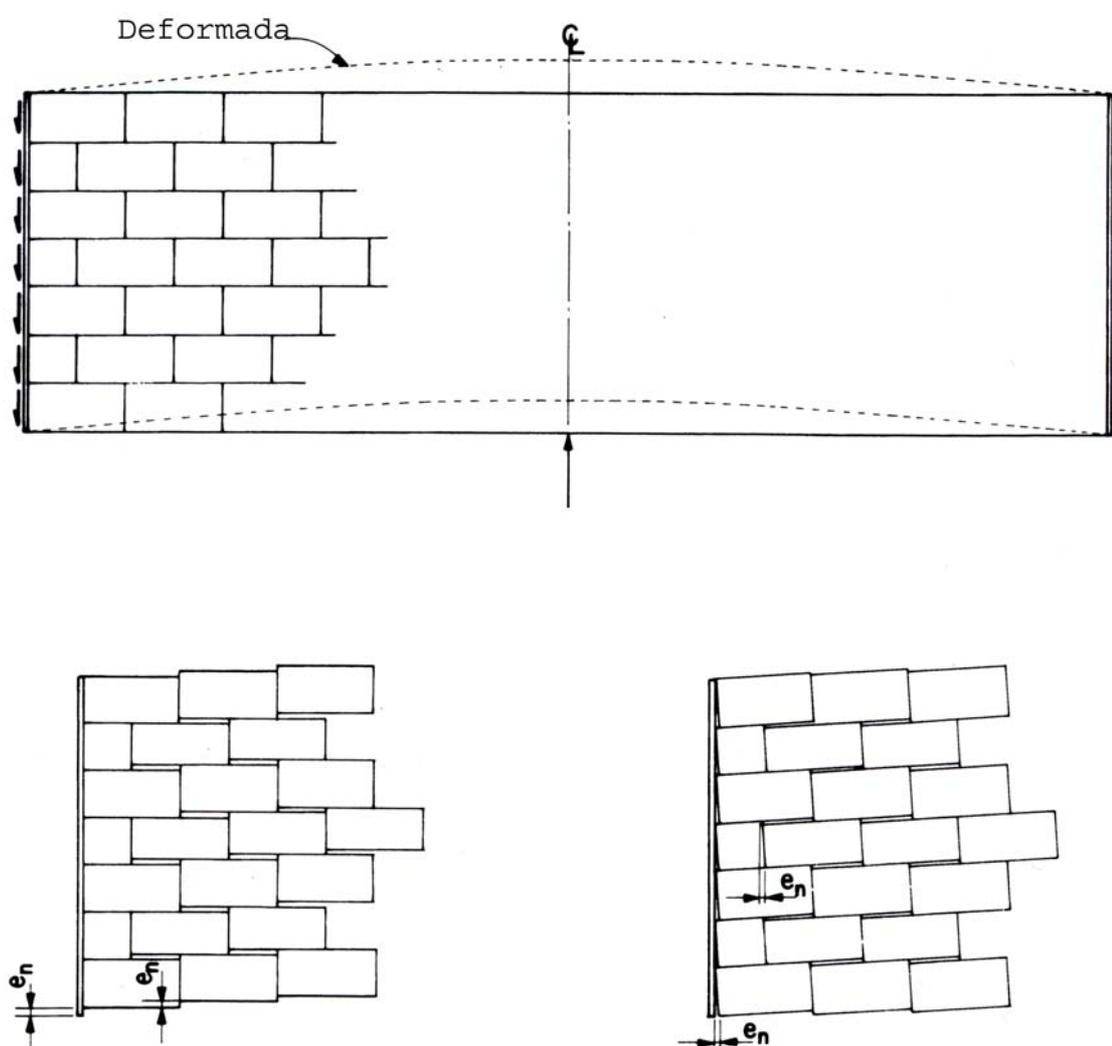
$$\Delta_s = \frac{(2 \cdot v \cdot b) \cdot L^2}{8 \cdot G \cdot t \cdot b}$$

$$\Delta_s = \frac{v \cdot L}{4 \cdot G \cdot t} \tag{5}$$

### 3.2.3 - Contribuição devida ao deslizamento dos pregos

O embutimento dos pregos nas fibras da madeira tem sido estudado há tempo. Reconhecidamente a deformação dos pinos é um dos fatores que contribui para os deslocamentos de estruturas de madeiras. O terceiro termo da fórmula de deflexão de diafragmas de chapas de madeira reconstituída leva em conta isto ( $\Delta_n = 0,0006 \cdot L \cdot e_n$ ).

A distribuição de esforços devido ao cisalhamento nos pregos das extremidades do painel é considerada igual nas duas extremidades do diafragma e o deslizamento dos pregos é igual à raiz quadrada de duas vezes o deslizamento ao longo de cada extremidade do painel. A contribuição do deslizamento dos pregos pode ser derivada, considerando os efeitos das componentes paralelas e perpendiculares à direção da força aplicada, pela combinação dos efeitos, separadamente. A Figura 20 apresenta o esquema de um diafragma em que as duas componentes do deslizamento dos pregos contribuem para o deslocamento transversal máximo no meio do vão.



**Figura 20** – Deslocamento “ $e_n$ ” devido ao deslizamento dos pregos.  
**Fonte:** ATC-7 Applied Technology Council. (1981).

O deslocamento individual dos pregos é proporcional à distorção dos painéis e ao alongamento observado no eixo diagonal do painel e pode ser determinado por:

$$e_{frame} = 2 \cdot e_n \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(45^\circ - \varepsilon)$$

em que:  $\varepsilon$  = ângulo formado pela diagonal com o eixo longitudinal do painel:  $26,6^\circ$  para painéis com 1220 mm por 2440 mm.

$$e_{frame} = 2,68e_n$$

O alongamento diagonal de painéis de madeira reconstituída devido ao cisalhamento é determinado pela deformação de placas, sendo expresso por:

$$e_s = \frac{v_i \cdot \ell_i \cdot \cos 2\alpha}{N}$$

em que:  $v_i$  = tensão de cisalhamento máximo dividido pela largura do diafragma, ou cisalhamento unitário expresso em N/mm;

$\ell_i$  = comprimento da diagonal do painel, para chapas de 1220 mm x 2440 mm é igual à 2728 mm;

$\alpha = (45^\circ - \varepsilon) \therefore \cos 2\alpha = 0,8$  para chapas de 1220 mm x 2440 mm;

$N$  = Módulo de rigidez rotacional =  $2G$  (Módulo de rigidez das chapas de madeira reconstituída,  $N/mm^2$ )

$$\text{Assim, } e_s = \frac{2.182 \cdot v_i}{2 \cdot G}$$

Usando a relação de proporcionalidade:  $\Delta_n / e_{frame} = \Delta_s / e_s$  temos que  $\Delta_n = b e_{frame} \Delta_s / e_s$

$v_i = v/t$  onde:  $t$  = espessura das chapas de madeira reconstituída, mm.

$$\Delta_n = \frac{2,68 \cdot e_n \cdot v \cdot L}{4 \cdot G \cdot t} \div \frac{2.182 \cdot v}{2 \cdot G \cdot t}$$

$$\Delta_n = 0,0006 \cdot L \cdot e_n \tag{6}$$

A componente devida ao deslizamento dos pregos, designado por “ $e_n$ ”, é determinada através de ensaios em laboratório com pequenos corpos-de-prova caracterizando o diagrama

carga-deslocamento do prego em estudo. Para um diafragma com carregamento uniforme, a deformação dos pregos será nula no eixo central e máxima nos apoios, com valor correspondente ao máximo esforço de cisalhamento atuante no diafragma.

### **3.3 - Efeito de aberturas**

A introdução de uma abertura em um diafragma, de acordo com o modelo apresentado, não tem nenhum efeito na contribuição no deslocamento dos banzos como pode ser observado no primeiro e último termo da equação. Há uma pequena contribuição devida à flexão, quando aberturas da alma acontecerem no interior do diafragma, mas isto não é refletido na fórmula atual uma vez que assume que todo esforço de flexão é resistido pelos banzos. A tensão de cisalhamento em qualquer local das seções remanescentes do diafragma é aumentada devido a redução de material disponível na alma. O efeito de uma abertura na deflexão é determinado através da análise clássica do segundo termo da equação (1), que usa integrações sobre os segmentos do diafragma.

A pregação das chapas de fechamento do diafragma nas áreas remanescentes à abertura deverá ser aumentada para resistir à força exigida. A contribuição da deflexão devido ao deslizamento dos pregos será afetada em qualquer caso.

### **3.4 – Condições de carregamento especiais**

O procedimento para projeto de diafragmas sob ação de carregamento não uniforme é igual aos empregados para qualquer viga sujeitada a estas cargas. A determinação do deslocamento transversal máximo, no meio do vão, deve ser feito com a modificação da fórmula básica derivando-se os coeficientes através do emprego da teoria clássica de vigas.

### **3.5 Critérios de dimensionamento**

Diafragmas em madeira podem ser dimensionados por meio de tabelas geradas a partir de extensivos ensaios em laboratórios de engenharia sob a ótica dos princípios da mecânica clássica. Tradicionalmente, as informações de ensaios experimentais têm sido utilizadas para verificação dos valores teóricos e vice-versa.

Nos EUA e Canadá os projetos de sistemas leves de madeira ainda são realizados com auxílio de tabelas elaboradas a partir de ensaios experimentais, considerando-se as características de dimensões e propriedades desejadas das vigas da ossatura. As tabelas foram desenvolvidas prevendo-se várias ações de projeto, exigências quanto à resistência e deflexões. Propriedades como tamanhos, classes e espécies da madeira são necessários para uma adequada análise do desempenho requerido pelo sistema de piso. Com base nas propriedades do material e determinação das cargas de projeto, é possível selecionar os elementos adequados para execução do projeto aplicando-se os critérios do Código Local de Edificação.

Para assegurar compatibilidade entre valores tabelados e as suposições teóricas, são adotados parâmetros de projeto para aplicabilidade dos princípios da mecânica. Considerações para dimensionamento de diafragmas horizontais, incluem:

- eficiência das ligações entre chapas de fechamento e elementos de ossatura,
- resistência das chapas de fechamento ao cisalhamento,
- disposição das chapas de fechamento,
- espessura das chapas de fechamento,
- forma de fixação das chapas de fechamento (alma),
- emprego de enrijecedores,
- espaçamento entre conectores (pregos e/ou parafusos),
- quantidade de conectores nas extremidades das chapas de fechamento,
- resistência dos elementos de ossatura,
- largura dos elementos de ossatura (largura da face para recepção dos conectores).

Quando do emprego das tabelas, a associação destes parâmetros em relação às características de projeto é determinada pelos projetistas para dimensionamento deste tipo de estrutura. A exemplificação desta prática é apresentada por Breyer et al (1998) e ainda hoje é a forma tradicionalmente empregada nos países de origem.

### **3.6 Modelagem numérica para diafragmas de piso**

Atualmente, análises mais sofisticadas são providas através de modelos computacionais que consideram o efeito da ação composta e redistribuição de esforços e demais interações de

todos os elementos constituintes do sistema de piso quando sujeitos a carregamentos verticais e horizontais.

Falk e Itani (1989) desenvolveram modelo computacional para diafragmas de madeira através do Método de Elementos Finitos com formulação não linear. Dentre os parâmetros avaliados, observou-se que o modelo demonstrou que a rigidez do diafragma é significativamente influenciada pela rigidez das ligações, pela utilização de elementos enrijecedores e pela densidade de pregos utilizados na fixação das chapas de fechamento.

O modelo demonstrou que a variação de  $\pm 10$  e  $\pm 20\%$  no módulo da ligação pregada corresponde respectivamente a uma variação de  $\pm 4$  e  $\pm 9\%$  na rigidez do diafragma, sob ação de carregamento padrão ao cisalhamento para diafragmas de piso igual a 134 N/m (185 lb/ft - International Conference of Building Officials 1985). Com a implementação do carregamento para 724 N/m o incremento de 10 e 20% no módulo da ligação pregada, corresponde ao respectivo incremento de 12 e 22% na rigidez do diafragma. Entretanto, o decréscimo de 10 e 20% no módulo da ligação pregada, corresponde ao respectivo decréscimo de 19 e 40% na rigidez do diafragma.

A variação no espaçamento entre pregos também foi analisada pelos autores, concluindo que a mesma apresenta um efeito mais significativo na rigidez do diafragma do que o efeito da rigidez da própria ligação pregada.

O efeito dos elementos enrijecedores na rigidez do diafragma foi estudado pelos citados autores, através da investigação de três modelos: diafragmas com enrijecedores pregados, diafragmas com enrijecedores sem pregos adicionais nas chapas de fechamento e diafragmas sem enrijecedores. O estudo permitiu concluir que diafragmas com enrijecedores são mais rígidos em função da armação adicional apresentada pelos elementos enrijecedores e devido ao acréscimo de pregos utilizados no perímetro das chapas de fechamento. Na faixa de 134 N/m de carga de cisalhamento, diafragmas com enrijecedores apresentaram valores de rigidez 16% superiores aos diafragmas com enrijecedores sem uso de pregos adicionais e 35% superior aos diafragmas sem enrijecedores. O que permite concluir que os pregos adicionais de fixação e a armação dos elementos enrijecedores tiveram uma contribuição muito semelhante para o aumento da rigidez do diafragma. Na faixa de 724 N/m (1000 lb/ft), os diafragmas com enrijecedores sem pregos adicionais apresentaram uma redução na rigidez de aproximadamente 34% e os diafragmas sem enrijecedores, uma redução de 49%, quando comparados com os diafragmas com enrijecedores. Os autores concluíram que na faixa de solicitações mais alta, o efeito dos elementos enrijecedores para a rigidez do diafragma é minorado.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para realização dos ensaios experimentais desta pesquisa, buscou-se identificar Normas nacionais e internacionais mais adequadas para cada etapa estudada, levando-se em consideração a possibilidade de comparação dos resultados obtidos com valores referenciais de bibliografia.

### **4.1 – Ensaios preliminares - Caracterização do *Pinus sp.***

Toda a madeira maciça utilizada na confecção dos protótipos foi doada pela empresa Batistella Indústria e Comércio Ltda. A madeira de *Pinus sp.* de procedência da região de Lages-SC era composta de lotes de barrotes de três diferentes seções: de 3 cm x 6 cm com 250 cm de comprimento; 5 cm x 7 cm com 250 cm de comprimento e 4 cm x 9 cm com 260 cm de comprimento. Para caracterização do material foram empregados os ensaios descritos no Anexo B da Norma brasileira NBR-7190/1997 – Projeto de Estrutura de Madeira, avaliando-se as seguintes propriedades:

- a) umidade;
- b) densidade;
- c) compressão paralela às fibras;
- d) tração paralela às fibras;
- e) cisalhamento;
- f) flexão.

### **4.2 – Ensaios preliminares - Caracterização das chapas de OSB (*Oriented Strand Board*).**

Todas as chapas de madeira, utilizada na confecção dos protótipos, foram doadas pela empresa Masisa do Brasil Ltda. Com o propósito de atender aos objetivos propostos nesse trabalho foram realizados ensaios de caracterização das chapas de OSB (*Oriented Strand Board*). Este produto está no mercado mundial desde o início da década de 1980, no entanto, no Brasil o OSB é um produto recente, tendo iniciado sua produção no ano de 2002 e seu emprego está em expansão pois existe uma vasta gama de aplicações estruturais. Neste trabalho por exemplo, as chapas foram utilizadas para o fechamento da estrutura de piso e na composição de vigas-I formando a alma do perfil.

Para uso estrutural do OSB no setor da construção civil é necessário que sejam conhecidas as propriedades mecânicas e características estruturais, que variam segundo as três direções ortogonais, embora o material possa ser considerado ortotrópico numa escala macroscópica, uma vez que as propriedades relativas às duas direções na superfície da chapa são relativamente próximas em comparação com as propriedades verificadas na direção da espessura.

A NBR 7190/97 não apresenta procedimentos para determinação das propriedades mecânicas das chapas reconstituídas de madeira, sendo assim, foram empregadas na pesquisa normas norte-americanas da ASTM – American Society for Testing and Materials, que oferecem metodologias de ensaio específicas para cada propriedade, levando em conta a orientação em relação às três direções ortogonais da chapa. Foram determinadas as seguintes propriedades: resistência e módulo de elasticidade à flexão (direções vertical, longitudinal e transversal); resistência e módulo de elasticidade ao cisalhamento ao longo da espessura.

#### 4.2.1 – Ensaio de flexão estática

A resistência da madeira à flexão é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão, calculado com a hipótese da madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e}$$

onde:

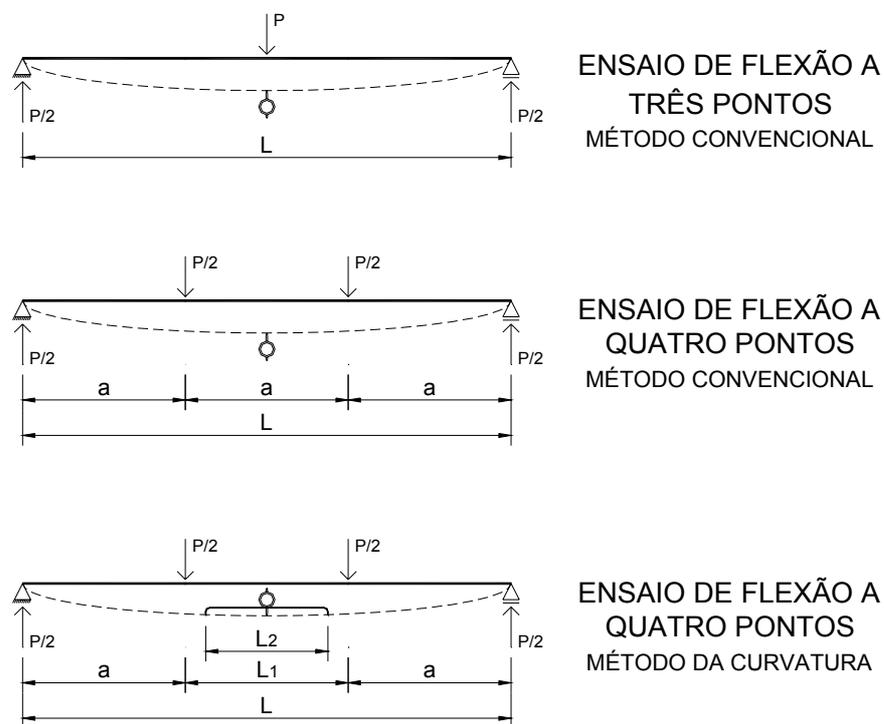
$M_{\max}$  é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em N·mm;

$W_e$  é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por  $bh^2/6$ , em mm<sup>3</sup>.

O módulo de elasticidade de um corpo-de-prova prismático está relacionado à medida da sua rigidez à flexão. Contudo, algumas normas de ensaio podem divergir com relação à forma de se obter a medida do deslocamento no meio do vão, o que traz algumas implicações importantes e que precisam estar bem compreendidas. As normas ASTM empregadas neste estudo, para os

ensaios de flexão estática, apresentam este tipo de diferença. Enquanto a norma ASTM D3043-95 – *Standard methods of testing structural panels in flexure*, utilizada no ensaio de flexão das chapas na posição horizontal (transversal e longitudinal) especifica ensaio a quatro pontos. A norma ASTM D 4761-96 – *Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material*, utilizada no ensaio de flexão das chapas na posição vertical, prevê ensaio de flexão a três pontos.

Na Figura 21 são apresentados os esquemas de ensaio a três e quatro pontos, bem como a maneira como deve ser feita a medida da deflexão no meio do vão.



**Figura 21** – Esquema do ensaio de flexão estática.

Segundo Guitard (1987), a diferença fundamental entre estes dois métodos está no produto final, isto é, no módulo de elasticidade à flexão obtido. Na flexão a três pontos, o diagrama carga-deslocamento é obtido com o registro simultâneo da carga aplicada e da deflexão total no meio do vão. A interpretação dos resultados é feita com base na teoria clássica da resistência dos materiais aplicada às vigas retas. Neste caso, obtém-se o módulo de elasticidade aparente ( $E_a$ ), pois o deslocamento vertical registrado no meio do vão incorpora tanto uma parcela devida a momento fletor, bem como outra devida a esforço cortante. O módulo de elasticidade é obtido a partir da inclinação do trecho inicial retilíneo do diagrama carga-deslocamento. No caso de peças de seção retangular, temos:

$$E_a = \frac{L^3}{48 \cdot I} \cdot \frac{(F_{50\%} - F_{10\%})}{(v_{50\%} - v_{10\%})}$$

onde:

$F_{10\%}$  e  $F_{50\%}$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo-de-prova, em N;

$v_{10\%}$  e  $v_{50\%}$  são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima  $F_{máx}$ , em mm;

$I$  é o momento de inércia da seção transversal do corpo-de-prova, em mm<sup>4</sup>;

$L$  é o vão entre os apoios, em mm.

O esquema estrutural do ensaio a quatro pontos apresenta um trecho central com momento fletor constante e, ao mesmo tempo, esforço cortante nulo. Neste caso, se for obtida a deflexão total no meio do vão, isto é, referente aos apoios extremos, obtém-se o módulo de elasticidade aparente ( $E_a$ ) através da seguinte equação:

$$E_a = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \cdot a}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 2bh^3} (3L^2 - 4a^2)$$

onde:

$F_{10\%}$  e  $F_{50\%}$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo-de-prova, em N;

$v_{10\%}$  e  $v_{50\%}$  são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima  $F_{máx}$ , em mm;

“b” e “h” correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em mm;

“L” é o vão entre os apoios, em mm;

“a” é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga.

No entanto, no ensaio a quatro pontos emprega-se geralmente o Método da Curvatura, no qual registra-se o deslocamento vertical no meio do vão, porém, relativo a outro ponto situado entre os pontos de atuação do carregamento, sendo preferível um ponto o mais afastado possível do meio do vão. A interpretação dos resultados é feita a partir do registro da variação da curvatura em função das cargas aplicadas. Neste caso, obtém-se o módulo de elasticidade à

flexão ( $E_x$ ) baseado exclusivamente na deformação por momento fletor. O desenvolvimento matemático conduz à equação:

$$E_x = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \cdot a}{(v'_{50\%} - v'_{10\%}) \cdot 8bh^3} (3(L - L_1)L_2^2)$$

onde:

$F_{10\%}$  e  $F_{50\%}$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo-de-prova, em N;

$v'_{10\%}$  e  $v'_{50\%}$  são os deslocamentos no meio do vão, medidos entre os pontos de aplicação de carga, correspondentes a 10% e 50% da carga máxima  $F_{máx}$ , em m;

“b” e “h” correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em m;

“L” é o vão entre os apoios, em mm;

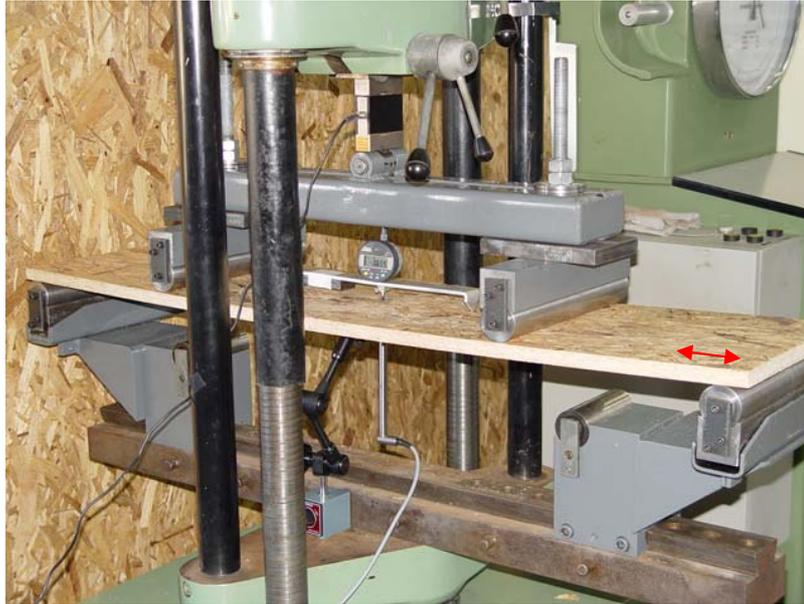
“ $L_1$ ” é a distância entre os pontos de aplicação de carga, em mm;

“ $L_2$ ” é a distância de referência para medição do deslocamento no vão central, em mm;

“a” é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga.

Como visto, os dois métodos podem fornecer valores diferentes para o módulo de elasticidade, devido ao fato da parcela do deslocamento devida ao cisalhamento estar sendo considerada ou não. Entretanto, de acordo com Bodig e Jayne (1992), quanto maior a relação do vão entre apoios e a altura da peça, menor a contribuição da parcela de esforço cortante na deflexão da viga. Para valores  $L/h$  de aproximadamente 21, esta contribuição é praticamente desprezível. A norma ASTM D 4761-96, que adota o ensaio de flexão a três pontos, preconiza que a relação  $L/h$  para o ensaio de chapas na posição vertical deve estar situada entre 17 e 21. Nestes casos, o módulo de elasticidade aparente ( $E_a$ ) se aproxima do módulo de elasticidade ( $E_x$ ).

Nas Figuras 22 e 23 é representada a montagem do ensaio à flexão da chapa, com relação à orientação predominante das fibras, nas direções longitudinais e transversais. As propriedades de resistência e rigidez obtidas neste ensaio são importantes quando a chapa recebe carregamento normal ao seu plano. No caso de diafragmas de piso e parede, por exemplo, estas propriedades definem a espessura da chapa a ser empregada, bem como o espaçamento entre montantes de parede ou entre as vigas de piso.



**Figura 22** – Ensaio de flexão com orientação longitudinal.



**Figura 23** – Ensaio de flexão com orientação transversal.

A Figura 24 apresenta a realização do ensaio à flexão da chapa na posição vertical. A resistência e rigidez obtidas neste ensaio são fundamentais em determinados casos, como por exemplo, quando emprega-se OSB para composição da alma de perfis em madeira.



**Figura 24** – Ensaio de flexão vertical.

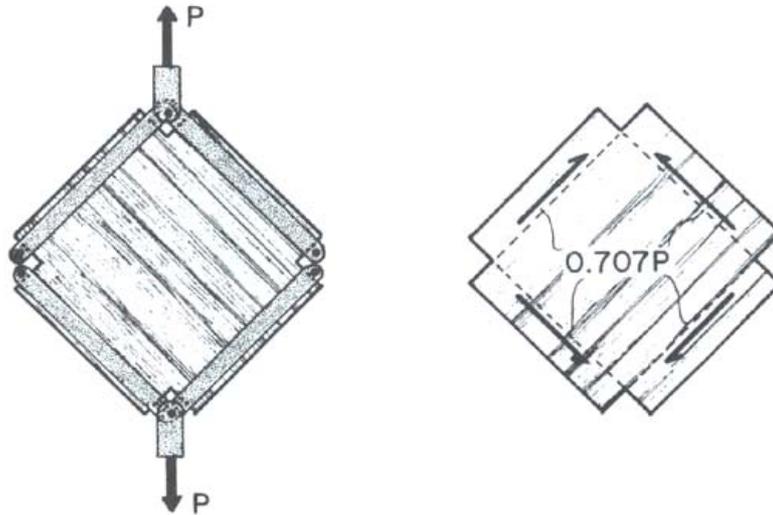
#### 4.2.2 – Ensaio de cisalhamento

O objetivo deste ensaio é a determinação da resistência e da rigidez ao cisalhamento. Os corpos-de-prova e os procedimentos de ensaios foram executados de acordo com o método B (corpos-de-prova de grandes dimensões) da norma norte-americana ASTM D 2719-89 - *Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness*.

No corpo-de-prova a área de cisalhamento deve ter no mínimo 610 mm de lado. Quando a espessura da chapa for menor que 12,7 mm, duas ou mais chapas devem ser coladas para garantir no mínimo essa espessura, tendo sido este procedimento adotado no caso das chapas de 12 mm. As quinas do corpo-de-prova devem ser arredondadas, com raio de 12,5 mm. As extremidades do corpo de prova são enrijecidas através de guias de madeira maciça coladas rigidamente em ambos os lados do corpo-de-prova, sendo necessárias para receber a aplicação do carregamento.

Segundo Bodig e Jayne (1992), o ensaio de cisalhamento ao longo da espessura foi concebido de modo a submeter o corpo-de-prova a um estado puro de tensões de cisalhamento no plano da chapa. O dispositivo de ensaio transforma as forças de tração aplicadas às extremidades do dispositivo, em esforços cisalhantes ao longo das arestas da chapa (Figura 25). A deformação deve ser registrada posicionando-se um transdutor de deslocamento, em ambas as faces, na direção da diagonal da chapa coincidente com a direção de atuação das forças de tração.

Fazendo-se uma transformação adequada, esta medida pode ser usada para a determinação da deformação de cisalhamento da chapa.



**Figura 25** – Esquema do ensaio de cisalhamento (fonte: BODIG e JAYNE, 1992).

A resistência ao cisalhamento deve ser tomada como sendo:

$$\tau = 0,707 \cdot \left( \frac{P}{L \cdot t} \right)$$

onde:

$\tau$  é a resistência ao cisalhamento (N/m<sup>2</sup>);

“P” é a força máxima aplicada (N);

“L” é o comprimento de cisalhamento de uma das arestas do CP (m);

“t” é a espessura do corpo-de-prova (m).

O módulo de elasticidade ao cisalhamento no plano da chapa é obtido a partir da relação tensão-deformação ao cisalhamento. A norma ASTM D 2719-89 fornece a equação para o cálculo do módulo de elasticidade ao cisalhamento (G), reproduzida a seguir:

$$G = 0,3536 \cdot \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{L_1}{L \cdot t}$$

onde:

$G$  é o módulo de elasticidade ao cisalhamento, em MPa;

$P/\Delta$  é o coeficiente angular da curva carga x deformação, em N/mm;

“ $L_1$ ” é o comprimento da medida do deslocamento, em mm;

“ $L$ ” é o comprimento de cisalhamento das arestas do corpo-de-prova, em mm;

“ $t$ ” é a espessura do corpo-de-prova, em mm.

Ainda segundo Bodig e Jayne (1992), este método requer corpos-de-prova de grandes dimensões e um intrincado dispositivo de ensaio, sendo por esta razão pouco empregado. Entretanto, faz-se a ressalva de que este método constitui-se num dos poucos métodos diretos de determinação do módulo de elasticidade ao cisalhamento, tornando-se uma opção promissora e que conduz a resultados satisfatórios.

O ensaio de cisalhamento ao longo da espessura está ilustrado na Figura 26. Em perfis de madeira sujeitos à flexão e em diafragmas de piso e parede submetidos a carregamento lateral (ex.: vento), a rigidez ao cisalhamento ao longo da espessura é empregada no cálculo da deflexão e da distorção destes elementos, respectivamente.



**Figura 26** – Ensaio de cisalhamento.

### 4.3 Estudo da ligação - Madeira / Pregos / Chapa de OSB

Para a realização destes ensaios utilizaram-se as prescrições da norma ASTM D-1761 – *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood (2000)*. Santos et al (2004) apresentam ensaios realizados, segundo os critérios desta norma, para determinar a rigidez e resistência de ligações realizadas com o emprego de diferentes tipos e dimensões de pregos. Os autores observaram que, para dimensões equivalentes, pregos lisos apresentam valores últimos de resistência menores do que pregos anelados e espiralados.

O desempenho das ligações pregadas entre madeira maciça e chapas de madeira reconstituída submetidas a carregamento lateral 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 um comportamento não-linear, o que determina um comportamento igualmente não-linear do diafragma como um todo.

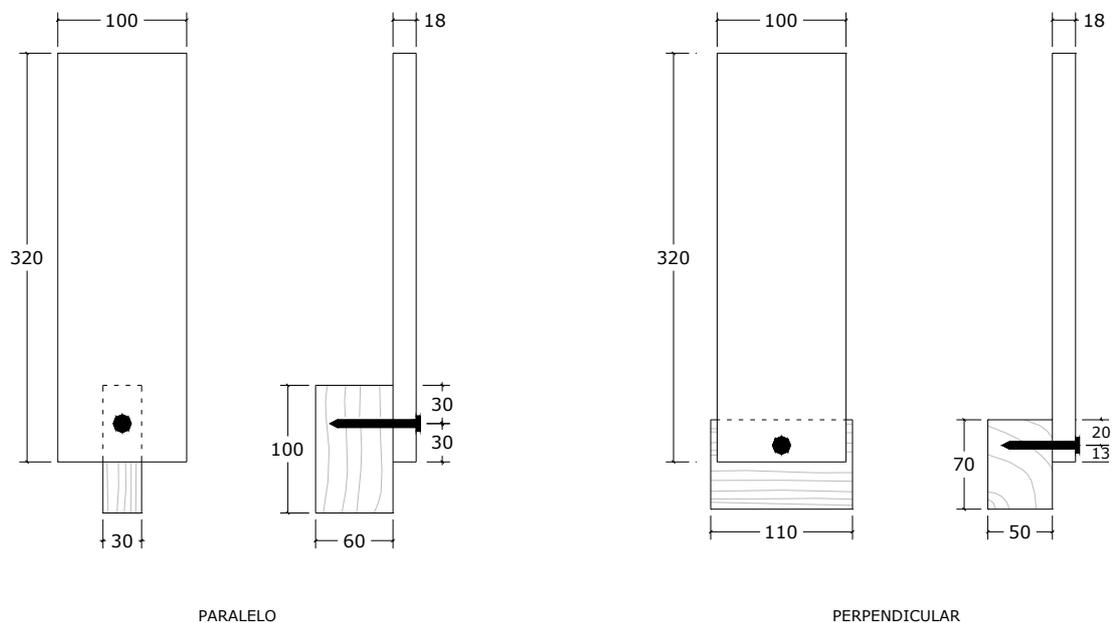
Diversos parâmetros exercem influência direta sobre o desempenho dos diafragmas de piso, tais como: espaçamento de pregos, distância entre montantes da ossatura, espessura da chapa de fechamento, densidade da madeira, etc. Além destes, a resistência e a rigidez das ligações pregadas entre a madeira da ossatura e as chapas de fechamento é um dos parâmetros mais importantes. Segundo Salenikovich (2000), os elementos da ossatura, sem as chapas de fechamento, são absolutamente incapazes de fornecer resistência e rigidez frente às cargas laterais (ex. vento). Para isto, a solidarização das chapas de fechamento à ossatura em madeira é essencial, sendo feita normalmente por meio de pregos.

#### 4.3.1 Configuração dos corpos-de-prova

O ensaio das ligações foi feito de acordo com a norma norte-americana ASTM D-1761 (2000) - *Standard test methods for mechanical fasteners in wood*, que prevê a atuação de carga lateral num corpo-de-prova formado por uma amostra da madeira da ossatura e da chapa de fechamento, unidas através de um único conector. Foram testados pregos 17x27 ( $\phi = 3,0$  mm;  $L = 62,10$  mm), do tipo liso para cravação manual (martelo) bem como pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7$ mm;  $L = 70$  mm) anelado aplicado com pregadeira pneumática.

Foi considerada neste estudo a orientação das fibras da madeira em relação à direção de aplicação da carga. Nos diafragmas de piso submetidos a carregamento lateral, este aspecto varia em função da posição do prego no elemento.

Nas ligações dos diafragmas de piso foram empregadas chapas de OSB com 18 mm de espessura. Conforme ilustrado na Figura 27, os barrotes de madeira têm seção 30 mm x 60 mm para o caso de solicitação do carregamento paralelamente às fibras da madeira, com distância de 30 mm entre o prego e borda da chapa e também entre o prego e a borda da peça de madeira. Por outro lado, no caso da carga perpendicular às fibras da madeira, os barrotes têm seção 50 mm x 70 mm, com a distância de 13 mm entre o prego e a borda da chapa e de 20 mm entre o prego e a borda da peça de madeira.



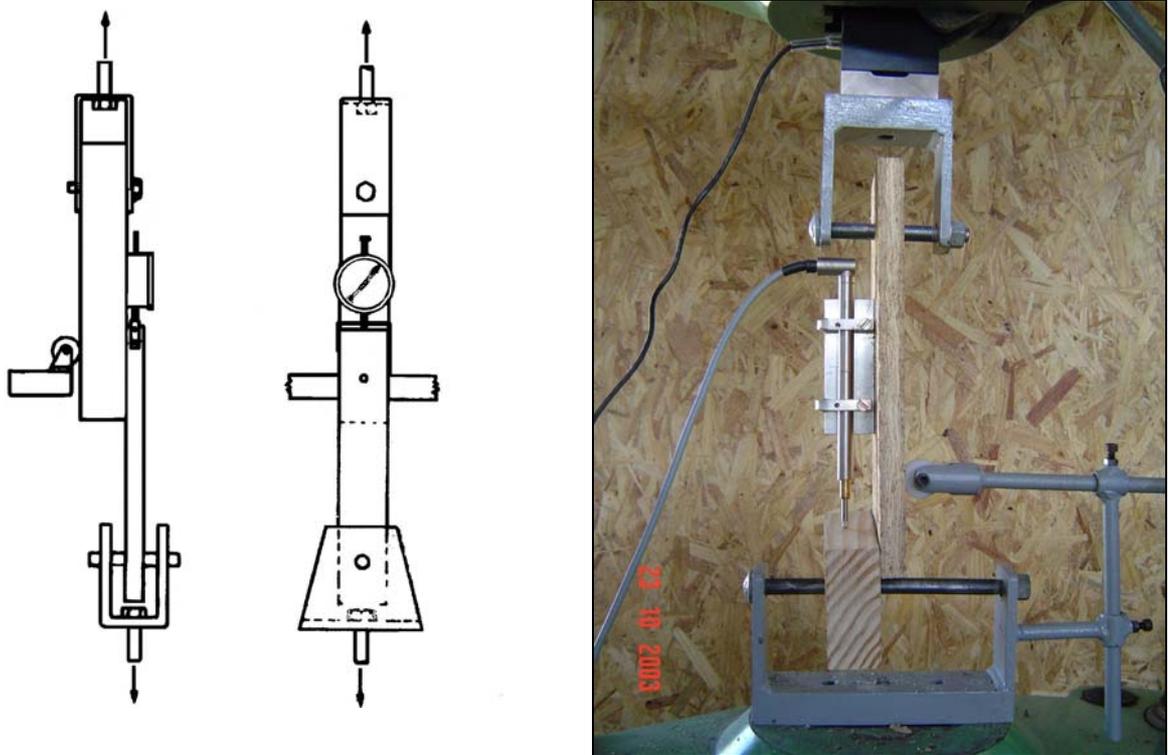
**Figura 27** – Corpos de prova confeccionados com chapas de OSB de 18 mm.

#### 4.3.2 Procedimentos de ensaio

Foi concebido um dispositivo de ensaio baseado no recomendado pela norma ASTM D-1761 *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood (2000)*, ilustrado na Figura 28. Este aparato é fixado na máquina universal de ensaios, permitindo a aplicação da carga lateral no corpo-de-prova representativo da ligação. Além disso, possui um rolete para manter o corpo-de-prova alinhado no dispositivo.

A instrumentação do ensaio foi feita com a fixação de um transdutor de deslocamento com curso de 20 mm preso à chapa de OSB, permitindo a medição do deslocamento relativo entre a chapa e a madeira, bem como a leitura concomitante da carga aplicada através de uma

célula de carga com capacidade para 500 kgf. Os dados foram armazenados por um sistema de aquisição de dados (HBM Spider-8), com visualização do diagrama carga-deslocamento em tempo real. Para cada corpo-de-prova ensaiado, foram obtidos os diagramas carga-deslocamento que foram empregados para caracterização da rigidez das ligações.



**Figura 28** – Esquema do dispositivo de ensaio proposto pela norma ASTM D-1761 (2000) e foto do dispositivo confeccionado para o ensaio.

#### 4.4 Confeção das vigas-I

A confecção de Vigas-I foi realizada de forma artesanal, empregando-se mesas em madeira de *Pinus sp.* e alma em OSB – Oriented Strand Board, conforme mostra a Figura 29.

Para a confecção das vigas-I, foram empregados quatro barrotes de *Pinus sp.* de seção 3 cm x 6 cm para as mesas e na alma, peças de OSB de 1,8 cm de espessura e 20 cm de altura com 250 cm de comprimento. A fixação das mesas foi realizada através de adesivo MUF 1242/2542 da Akzo Nobel, resina melamina-urea com catalizador, distribuída com aproximadamente 500 g/m<sup>2</sup> em uma face, com proporção de mistura bi-componente de 100 partes em peso de 1242 para 25 partes em peso de 2542, conforme orientação do fabricante. A pressão de colagem foi realizada por intermédio de pregos anelados de 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ), aplicados de forma intercalada a cada 15 cm através de pregadeira pneumática. O período entre confecção e utilização das vigas nos protótipos foi de aproximadamente 5 dias em condições ambiente.



**Figura 29** – Confeção das vigas-I empregadas como elementos de ossatura.

Nas Figuras 30, 31 e 32 são representados, respectivamente, o processo de aplicação do adesivo, a montagem e ajuste da viga e, fixação das mesas.



**Figura 30** – Aplicação e distribuição do adesivo nas mesas.



**Figura 31** – Montagem e ajuste da viga-I com auxílio de gabarito.



**Figura 32** – Fixação das mesas da viga-I com auxílio de pregadeira pneumática.

Para o dimensionamento de estruturas compostas por chapas de madeira reconstituída, na flexão, a Norma brasileira, NBR-7190/1997 – Projeto de Estrutura de Madeira, considera que a mesma deve ser feita levando-se em conta a contribuição exclusiva das mesas tracionadas e comprimidas no cálculo das tensões normais, sem redução das suas áreas. A alma e ligações devem ser dimensionadas em função do cisalhamento, considerando a viga como se fosse de seção maciça. Nas vigas submetidas à flexão com força cortante, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais é expressa por:

$$\tau_d \leq f_{v0,d}$$

onde:

$\tau_d$  é a máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça e,  
 $f_{v0,d}$  é a resistência de cálculo ao cisalhamento do material da alma.

Considerando que os montantes da mesa são ligados à alma com o emprego de adesivo de alta resistência, um considerável rigor foi adotado para assegurar que a resistência da junta colada seja no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira.

A avaliação deste tipo de viga-I é apresentada por Lima et al. (2004) e, tema de dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC.

#### **4.5 Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso**

Trabalhos recentes coordenados pela *CUREe - California Universities for Research in Earthquake Engineering* para revisão de Códigos U.S.A., Task 1.4.2 – *Design Methodology for Diaphragms* (2001), em desenvolvimento pelo Prof. Dr. J. Daniel Dolan para avaliação do desempenho de diafragmas horizontais em madeira, utiliza como referência a Norma ASTM E-455(1998) - American Society of Testing and Materials (ASTM), "*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: (1) avaliar a capacidade estrutural do diafragma horizontal sob simulação de carregamento estático e (2) 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, através de 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 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 o mesmo possa conter sistemas de ligação que reproduza parâmetros reais. No mínimo, dois espécimes deverão ser ensaiado quando existe a necessidade de se determinar 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 carga, usada no primeiro espécime. Se os resultados diferirem mais que 10% do valor mais baixo, um terceiro espécime será testado, sendo o mesmo orientado da mesma maneira que o mais fraco, dos dois testes anteriores. Um valor médio é computado entre dois valores mais baixos, dos três corpos 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.

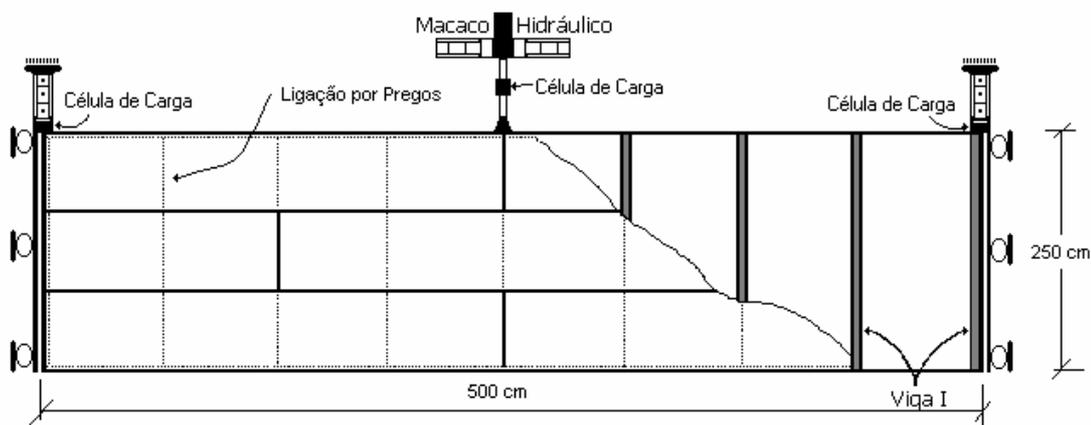
#### **4.5.1 – Configuração dos diafragmas horizontais**

O foco principal dos ensaios experimentais é a quantificação da resistência e rigidez de diafragmas horizontais de madeira, para posterior comparação com modelos matemáticos, desenvolvidos com auxílio do programa computacional de uso comercial SAP-2000 v.8.

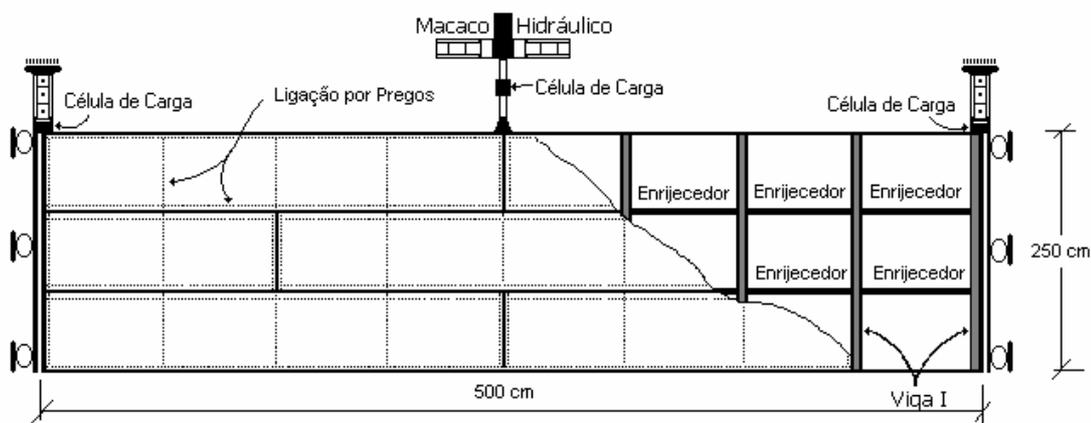
Neste Processo são investigados a influência do emprego de elementos enrijecedores na ossatura dos diafragmas e a influência de diferentes densidades e tipos de pregos utilizados na fixação das chapas de fechamento.

As chapas de OSB, doadas para o desenvolvimento desta pesquisa, com 84 cm de largura por 250 cm de comprimento permitiram estabelecer as configurações dos protótipos com atendimento das dimensões mínimas estabelecidas pela norma de ensaio E 455-98 da ASTM. Conseqüentemente, respeitando-se as dificuldades encontradas para a realização de ensaios desta invergadura, para o atendimento dos parâmetros investigativos, foi possível estabelecer três diferentes espaçamentos com distribuição uniforme de pregos: 100, 205 e 410 mm, e três sistemas de fixação das chapas de fechamento, nos elementos de ossatura: **(Configuração 1)** vigas de ossatura sem dispositivos enrijecedores, conforme ilustrado na Figura 33;

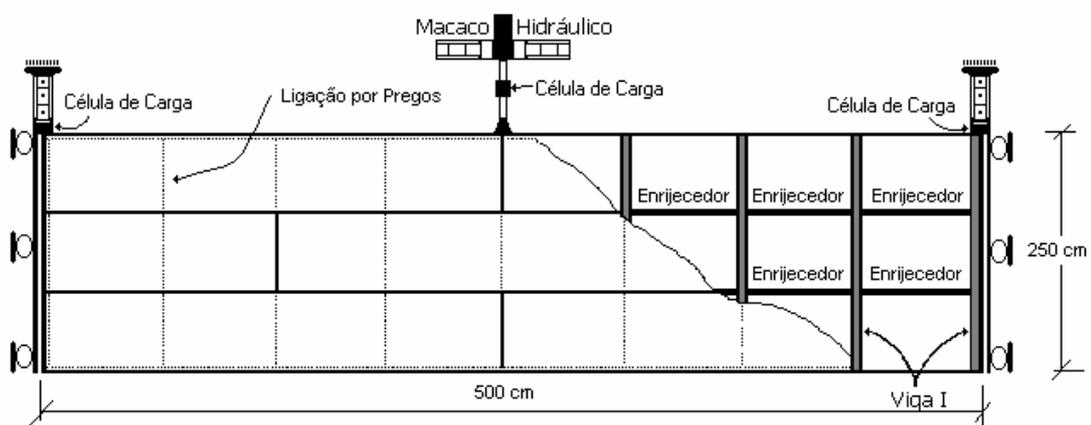
(**Configuração 2**) ossatura com fixação das chapas de fechamento através de dispositivos enrijecedores, conforme ilustrado na Figura 34 e (**Configuração 3**) ossatura com dispositivos enrijecedores mas sem a fixação das chapas de fechamento nos dispositivos enrijecedores, conforme ilustrado na Figura 35.



**Figura 33** – Protótipos sem dispositivos enrijecedores - configuração 1.



**Figura 34** – Protótipos com dispositivos enrijecedores - configuração 2.



**Figura 35** – Protótipos com dispositivos enrijecedores mas sem a fixação das chapas de fechamento nos dispositivos enrijecedores - configuração 3.

#### 4.5.2 – Confeção dos protótipos de diafragmas horizontal de piso

O trabalho foi realizado no Laboratório de Experimentação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. A confecção dos protótipos seguiu a seguinte metodologia: Confeção de dois banzos com seção 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.

A montagem dos banzos foi realizada com a sobreposição de peças de *pinus sp.* de seção 4 cm x 9 cm unidas por pregos anelados de 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ), aplicados de forma intercalada a cada 15 cm, com auxílio de pregadeira pneumática. Cada banzo utilizou duas peças de 120 cm de comprimento, duas peças de 260 cm de comprimento e uma peça de 240 cm, assim distribuídas: uma peça de 260 cm e uma de 240 cm na primeira camada e as demais peças na segunda camada, ficando a de 260 cm no centro, procedendo de forma a intercalar as emendas das peças.

A fixação das vigas-I nos banzos foi realizada com auxílio de cantoneiras metálicas, com abas de 5 cm x 5 cm e 4 mm de espessura, com três pregos de 2,7x 70 em cada aba, num total de 12 pregos em cada extremidade das vigas. A Figura 36 apresenta a forma de fixação das vigas-I nos banzos e a Figura 37 mostra a disposição das nove vigas-I, devidamente fixada aos banzos.



**Figura 36** – Representação da Fixação das Cantoneiras.



**Figura 37** – Fixação das vigas-I nos banzos através de cantoneira metálica.

Nas Figuras 38 e 39 são exibidas a forma de fixação dos elementos enrijecedores de *pinus sp.*, de seção de 5 cm x 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 38** – Fixação dos elementos enrijecedores nas vigas-I.

A fixação dos elementos enrijecedores foi realizada com auxílio de sargento de carpinteiro, conforme mostra a Figura 38, e a ligação realizada através de pregos anelados de 2,7 mm de espessura por 70 mm de comprimento, aplicados através de pregadeira pneumática.



**Figura 39** – Elementos enrijecedores nas vigas-I.

As Figuras 40 e 41 mostram a fixação das chapas de OSB nos elementos enrijecedores e vigas-I e a Figura 42 apresenta a fixação das chapas nas vigas-I sem o emprego de enrijecedores.



**Figura 40** – Detalhe da fixação das chapas de osb nos enrijecedores e nas vigas-I.



**Figura 41** – Vista geral da parte inferior de diafragmas com enrijecedor.



**Figura 42** – Representação da fixação das vigas-I em diafragmas sem enrijecedor.

### 4.5.3 - Variáveis envolvidas na confecção dos protótipos

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

**Tabela 1** – Parâmetros variáveis para ensaio dos diafragmas horizontais de piso.

Parâmetros Variáveis	Especificação
(1) Tipo de prego	2,7 x 70 Anelado (pneumático) 17 x 27 Liso (martelo)
(2) Espaçamento entre pregos	100 mm 205 mm 410 mm
(3) Configuração do diafragma	Com enrijecedores Sem enrijecedores Com enrijecedores despregados

**Tabela 2** – Parâmetros fixos para ensaio dos diafragmas horizontais de piso.

Parâmetros Fixos	Especificação
Altura da viga-I	200 mm
Seção das mesas da viga-I	2x( 78 mm x 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 m x 2,50 m
Espessura da chapa de fechamento	18 mm
Orientação das chapas de fechamento	Igual orientação do protótipo
Disposição das chapas de fechamento	2 inteiras + ( ½+ inteira+ ½ )+ 2 inteiras
Afastamento do prego-borda OSB	20 mm
Dimensões do protótipo	2,50 m x 5,00 m

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

**Tabela 3** – Número de protótipos ensaiados de acordo com os parâmetros investigados.

Espaçamentos entre pregos	Tipo de prego	Número de protótipos ensaiados		
		configuração 1	configuração 2	configuração 3
100 mm	2,7 x 70	-	dois	-
205 mm	2,7 x 70	três	três	dois
	17 x 27	dois	-	-
410 mm	2,7 x 70	-	dois	-

#### 4.5.4 – Instrumentação utilizada no ensaio dos protótipos

Os ensaios experimentais dos diafragmas horizontais foram realizados com 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 mostra a Figura 43 e 44 abaixo.



**Figura 43** – Estrutura de contenção dos diafragmas horizontais de piso.



**Figura 44** – Dispositivos rotativos da estrutura de contenção.

Os dispositivos rotativos (Figura 44) além de permitir o deslocamento horizontal dos protótipos também são responsáveis pela contenção vertical dos mesmos, uma vez que existe a possibilidade deste 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 44, permitindo seu deslizamento e realizando sua contenção horizontal. Estas guias metálicas são dotadas de elos de corrente que permitem a articulação e ajuste às células de carga dos apoios, como mostra a Figura 45.



**Figura 45** – Disposição das células de carga nos diafragmas horizontais de piso.

Observa-se na Figura 45 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 aquisição dos valores de deformação e carregamento empregou-se o sistema “spider 8” da HBM, conforme exibe a Figura 46.



**Figura 46** – Sistema de aquisição de dados empregado no ensaio dos protótipos.

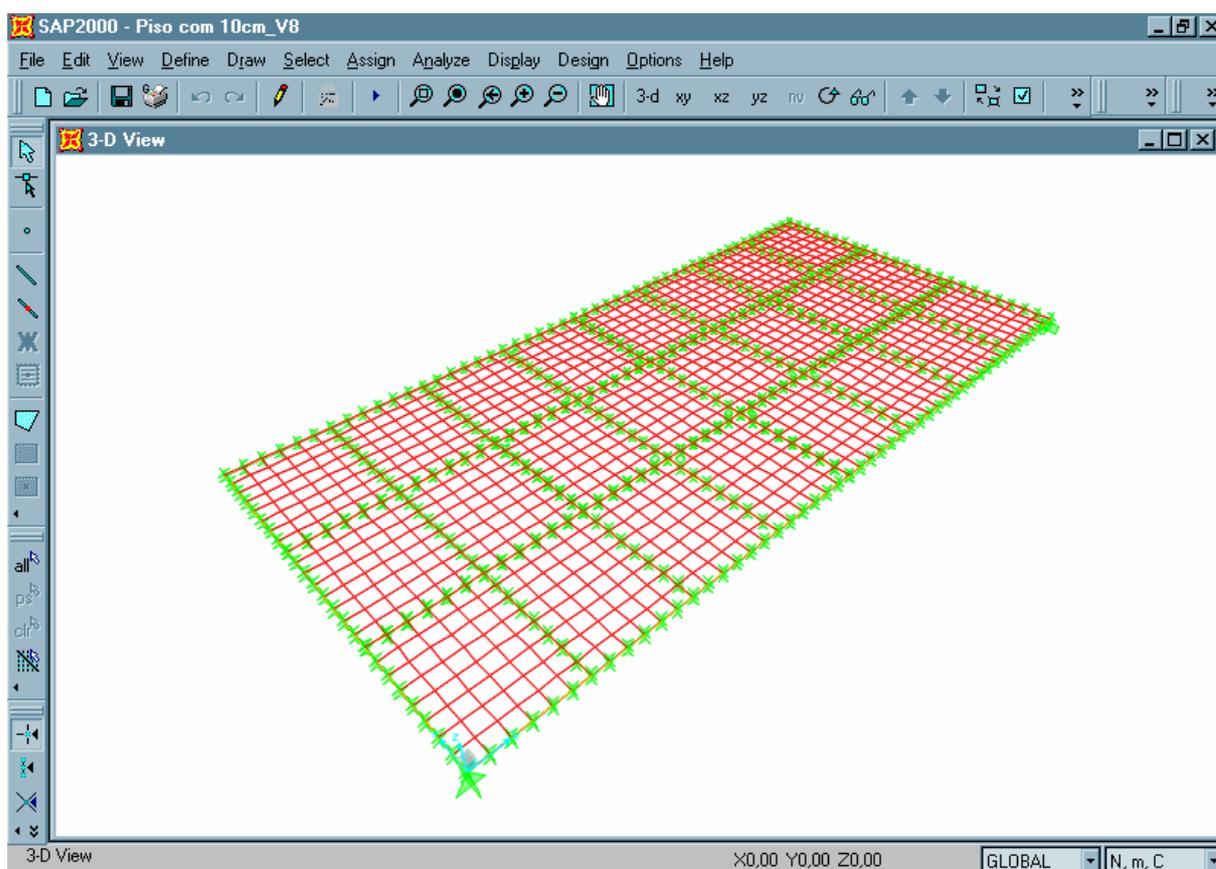
O monitoramento dos deslocamentos relativos das chapas de fechamento e da flecha máxima do diafragma foi realizado com emprego de transdutores de deslocamento, como apresentado na Figura 47.



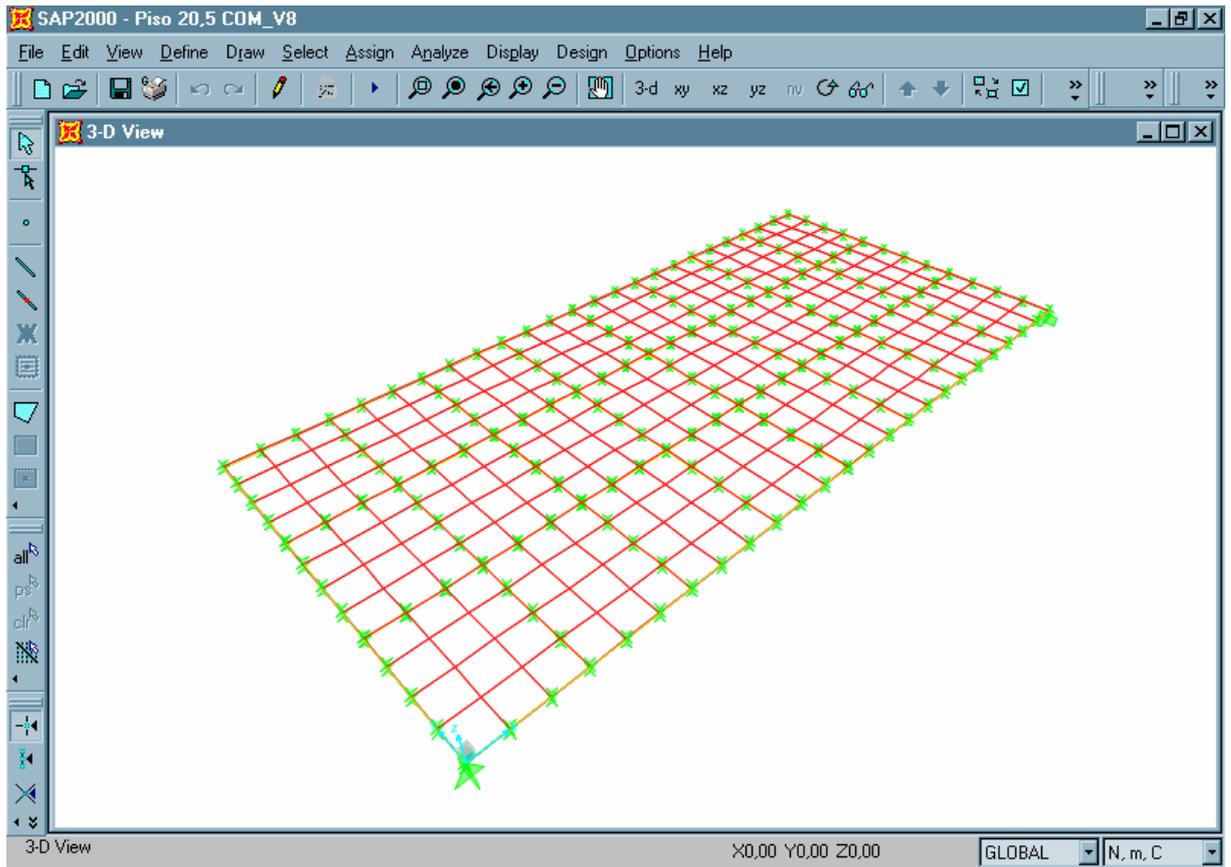
**Figura 47** – Disposição dos transdutores de deslocamento nos protótipos.

#### 4.6 - 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 tipo “membrane” e os pregos das ligações por elementos de molas com propriedades elásticas multilíneas. 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 e 205 mm) e 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 representados nas Figuras 48 e 49, respectivamente.



**Figura 48** – Modelo numérico desenvolvido com malha de 100 mm.



**Figura 49** – Modelo numérico desenvolvido com malha de 205 mm.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 – Ensaio preliminares - Caracterização do *Pinus sp.*

Para caracterização da madeira maciça, barrotos de *Pinus sp.* com seção de 5 cm x 7 cm foram empregados para a confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios enumerados no item 4.1. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos a partir de doze amostras coletadas ao acaso.

**Tabela 4** – Valores das propriedades da madeira de *Pinus sp.*

Corpo de prova Nº	Umidade (%)	Densidade Básica (Kg/m³)	Densidade Aparente (Kg/m³)	Resistência (Mpa)				Rigidez (Mpa)	
				Compressão Paralela	Tração Paralela	Cisalhamento	Flexão	Compressão Paralela	Flexão
CP-01	11,24	402,78	473,03	22,73	84,26	4,14	72,17	9945,48	12816,93
CP-02	8,96	436,87	511,59	32,61	88,37	3,93	50,41	8520,85	9628,79
CP-03	9,01	351,39	409,33	32,30	47,72	3,21	49,84	7242,15	7685,09
CP-04	9,47	296,98	346,09	31,68	53,00	3,42	60,12	7646,24	10153,22
CP-05	9,13	432,90	520,18	54,10	83,70	4,33	71,11	15499,58	12600,85
CP-06	10,02	334,05	396,95	35,53	108,08	3,92	78,45	9925,33	12480,20
CP-07	9,64	423,74	501,31	21,21	79,09	4,34	90,07	15011,90	12349,18
CP-08	9,51	396,53	465,11	44,37	77,73	4,42	64,31	10373,63	12081,46
CP-09	8,73	452,49	550,67	53,45	103,41	4,98	94,60	17807,35	15753,62
CP-10	9,50	402,10	483,95	48,83	60,72	3,61	77,57	14057,83	13651,98
CP-11	8,91	343,93	405,96	43,37	66,36	3,93	53,21	11747,15	11719,79
CP-12	9,08	399,97	476,95	53,29	79,63	4,59	107,73	16243,23	20430,11
Média	9,43	389,48	461,76	39,46	77,67	4,07	72,47	12001,73	12612,60
Desvio-Padrão	0,68	47,60	60,05	11,74	18,36	0,50	18,33	3595,64	3198,01
CV	7,18	12,22	13,01	29,75	23,64	12,39	25,29	29,96	25,36

Para caracterização da madeira maciça, empregada nas mesas das vigas-I, foram realizados ensaios de flexão com oito barrotos de *Pinus sp.* com seção de 3 cm x 6 cm orientados conforme o emprego nas vigas, cujos os resultados estão apresentados na Tabela 4. Analizando-se as Tabelas 3 e 4, a rigor, devido aos elevados valores dos coeficientes de variação (CV), seria necessário uma pré-classificação de todo o lote de madeira maciça. Entretanto, em virtude da disponibilidade do material, não foi possível realizar este procedimento.

**Tabela 5** – Valores das propriedades das mesas de *Pinus sp* das vigas-I.

Corpo de prova N°	Umidade (%)	Densidade Básica (Kg/m³)	Flexão	
			Resistência (Mpa)	Rigidez (Mpa)
CP-01	10,85	513,23	91,05	13730,93
CP-02	10,69	483,67	78,57	9937,62
CP-03	10,96	434,02	56,15	10432,23
CP-04	10,59	377,39	60,87	9310,99
CP-05	11,46	557,86	87,50	15632,55
CP-06	11,72	528,21	108,74	12637,24
CP-07	11,20	390,99	55,84	8745,25
CP-08	10,90	375,14	57,81	8601,50
Média	11,04	457,56	74,56	11128,54
Desvio-Padrão	0,39	72,74	19,93	2580,35
CV	3,51	15,90	26,73	23,19

**5.2 – Ensaio preliminares - Caracterização do OSB (*Oriented Strand Board*).**

A Tabela 5 apresenta os valores das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios.

**Tabela 6** – Valores das propriedades das chapas de OSB de 18 mm.

Corpo de prova N°	Resistência (MPa)				Rigidez - Circular (MPa)		Rigidez - Aparente (MPa)			Rigidez (MPa)
	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Cisalhamento	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Cisalhamento
CP-01	19,0	29,1	33,8	5,1	3004,4	6062,6	2852,5	6149,9	5788,2	1788,1
CP-02	19,1	24,6	25,5	4,9	2610,8	5273,1	2531,5	5495,2	4379,8	1893,0
CP-03	19,3	27,5	33,5	5,5	2967,9	5686,0	2708,2	5852,5	5443,4	1755,8
CP-04	16,7	29,7	24,3	5,4	2769,2	6042,1	2581,7	6043,2	4345,7	1817,4
CP-05	16,8	26,1	25,3	4,6	2839,0	5633,1	2629,8	5682,6	4615,8	1867,7
CP-06	17,6	24,5	32,7	4,5	2701,3	5322,6	2626,2	5716,5	5094,6	1753,1
CP-07	19,6	29,4	24,5	5,1	3065,2	5673,7	2900,8	6116,0	4804,4	1707,8
CP-08	18,8	27,8	23,6	5,4	3110,4	5499,5	2924,5	5879,9	4257,5	1865,3
Média	18,4	27,3	27,9	5,1	2883,5	5649,1	2719,4	5867,0	4841,2	1806,0
Desvio-Padrão	1,1	2,1	4,5	0,4	180,8	292,3	153,0	229,4	557,4	65,8
CV (%)	6,3	7,7	16,2	7,7	6,3	5,2	5,6	3,9	11,5	3,6

A partir de uma análise da Tabela 5, observa-se inicialmente que os coeficientes de variação das chapas de OSB, tanto para os valores de resistência como para os de rigidez, são significativamente inferiores àqueles normalmente apresentados pela madeira maciça. Isto é uma característica típica das chapas de madeira reconstituída em geral, e se deve ao processo industrial que tende a homogeneizar as propriedades do material.

As Figuras 50, 51 e 52 mostram as formas de ruptura observadas nos ensaios de flexão e de cisalhamento.



**Figura 50** – Ruptura verificada no ensaio de flexão vertical.



**Figura 51** – Ruptura verificada nos ensaios de flexão transversal e longitudinal.



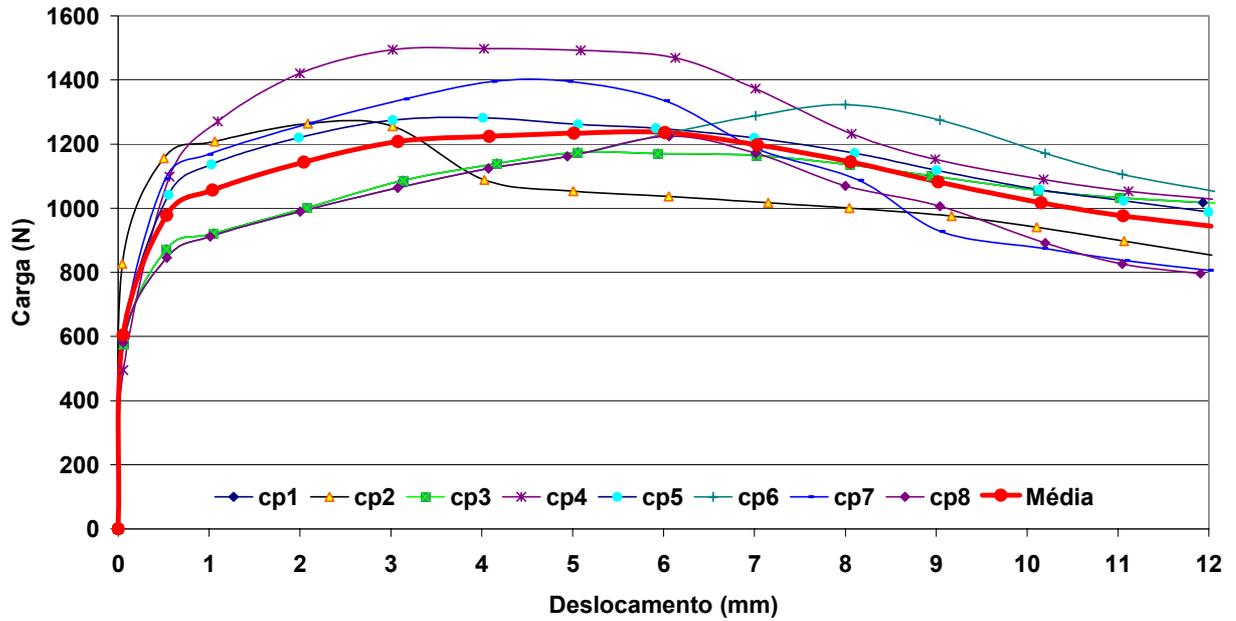
**Figura 52** – Ruptura dos corpos-de-prova de cisalhamento ao longo da espessura.

Observa-se nas Figuras 50 e 51 que a ruptura é ocasionada devido aos esforços de flexão, entretanto, na Figura 52 observa-se a ocorrência de ruptura devido aos esforços de tração ao invés de esforços de cisalhamento, tal comportamento, provavelmente é decorrente do processo de fabricação do OSB. Stamato (2002) empregou o mesmo dispositivo, para ensaios de corpos de prova confeccionados com chapas de madeira compensada, obtendo ruptura devida aos esforços de cisalhamento.

Os resultados obtidos denotam a viabilidade dos procedimentos de ensaio contidos nas normas ASTM, adotadas neste estudo experimental, uma vez que os valores de resistência e rigidez à flexão são compatíveis com os fornecidos pelo fabricante.

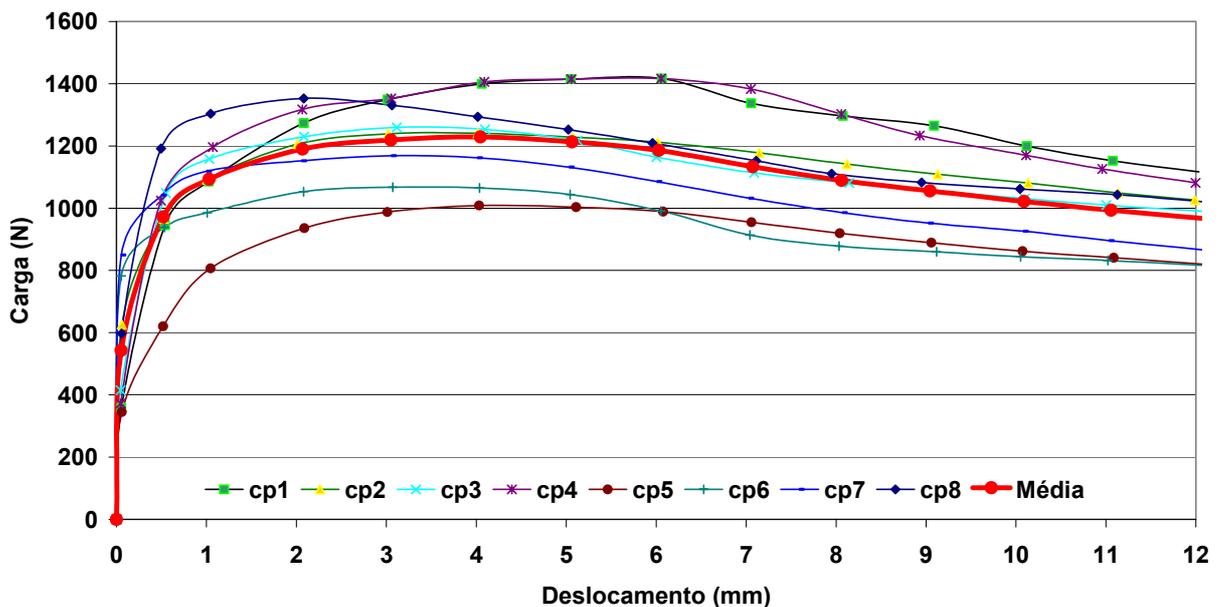
### **5.3 Estudo da ligação - Madeira / Prego / Chapa de OSB**

A Figura 53 apresenta os resultados dos ensaios experimentais, conforme descrição do item 4.3.2, sob a forma de diagrama carga-deslocamento, da série de corpos-de-prova confeccionados com chapas de OSB de 18 mm e barrotes de seção 50 mm x 70 mm, com ligação através de pregos 17x27 ( $\phi = 3,0$  mm;  $L = 62,10$  mm) lisos e solicitação na direção perpendicular às fibras do barrote.



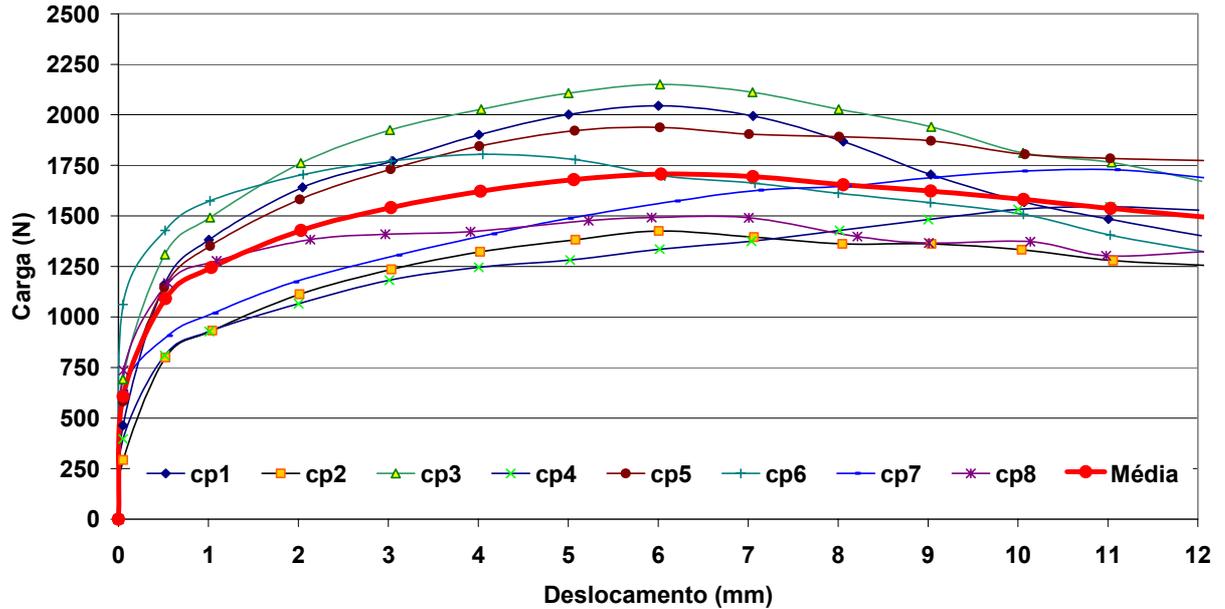
**Figura 53** – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção perpendicular às fibras do barrote.

A Figura 54 apresenta os resultados dos ensaios experimentais, conforme descrição do item 4.3.2, sob a forma de diagrama carga-deslocamento, da série de corpos-de-prova confeccionados com chapas de OSB de 18 mm e barrotes de seção 30 mm x 60 mm, utilizando ligação com pregos 17x27 ( $\phi = 3,0$  mm;  $L = 62,10$  mm) lisos e solicitação na direção paralela às fibras do barrote.



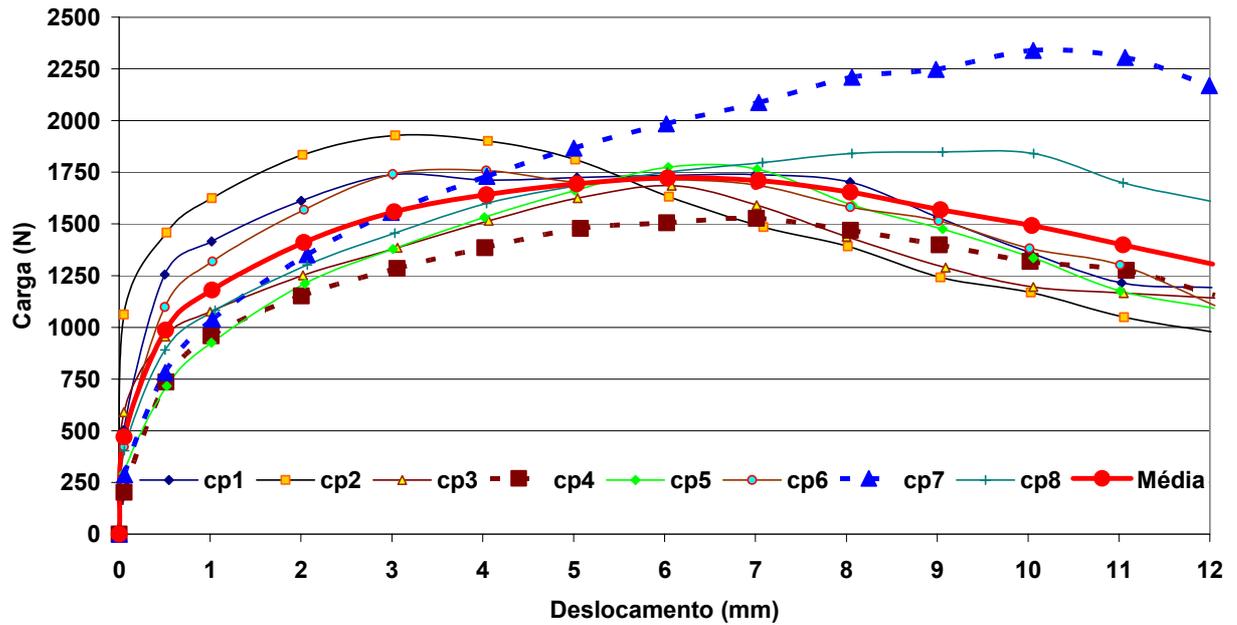
**Figura 54** – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção paralela às fibras do barrote.

A Figura 55 apresenta os resultados dos ensaios experimentais, conforme descrição do item 4.3.2, sob a forma de diagrama carga-deslocamento, da série de corpos-de-prova confeccionados com chapas de OSB de 18 mm e barrotes de seção 50mm x 70mm, com ligação através de pregos anelados de 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ) e solicitados na direção perpendicular às fibras do barrote.



**Figura 55** – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção perpendicular às fibras do barrote.

A Figura 56 apresenta os resultados dos ensaios experimentais, conforme descrição do item 4.3.2, sob a forma de diagrama carga-deslocamento, da série de corpos-de-prova confeccionados com chapas de OSB de 18 mm e barrotes de seção 30 mm x 60 mm, com ligação através de pregos anelados 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ) e solicitados na direção paralela às fibras do barrote.



**Figura 56** – Diagrama carga-deslocamento das ligações solicitadas na direção paralela às fibras do barrote.

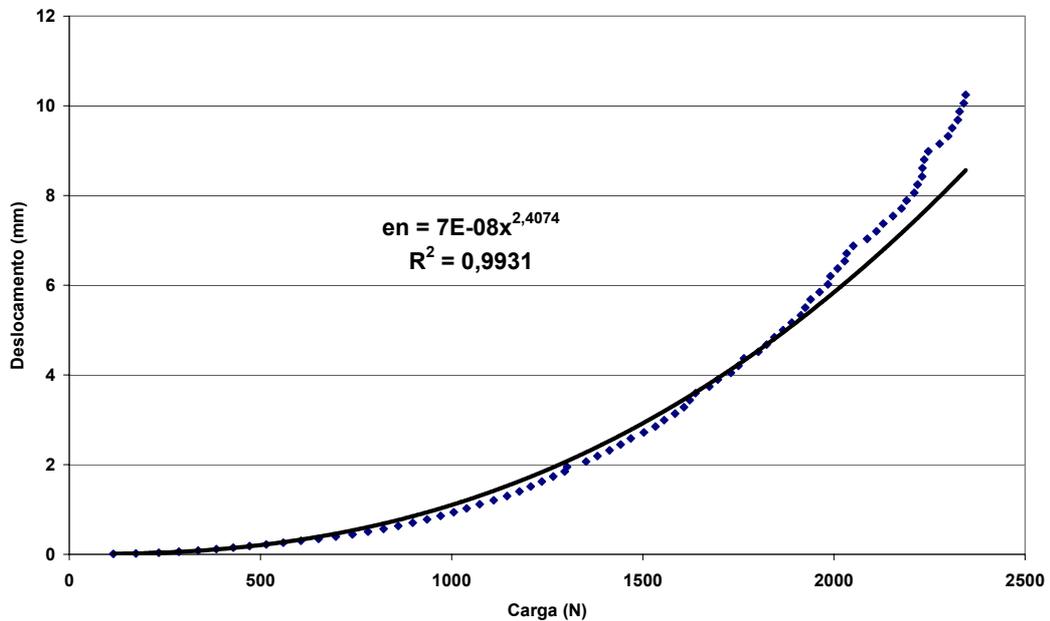
Observa-se nas Figuras 53 a 56 que devido à variabilidade dos resultados experimentais, valores médios são representados com objetivo de se estabelecer uma possível comparação dos resultados. Os valores médios, nas Figuras citadas, demonstram que a orientação das fibras na direção paralela e perpendicular não resultou em elevadas variações, no que tange à resistência e rigidez das ligações, para os dois tipos de prego em questão. Entretanto, ligações com emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ) apresentaram resistência média de 1750 N e as ligações com emprego de pregos 17x27 ( $\phi = 3,0\text{ mm}$ ;  $L = 62,10\text{ mm}$ ) apresentaram resistência média de 1250 N.

Considerando que a variabilidade dos resultados apresentados é inerente às variabilidades das propriedades físicas e mecânicas da madeira empregada, buscou-se neste trabalho não somente o emprego de médias, mas, avaliar a influência de se trabalhar com limites inferiores e superiores conforme destaca a Figura 56.

#### 5.4 Formulação para cálculo do deslizamento da ligação.

Segundo APA (2000), a contribuição devida ao deslizamento dos pregos, conforme descrito no item 3.2.3, é determinada pelo diagrama carga deslocamento característico para o prego utilizado, sendo que o valor de “ $e_n$ ” normalmente é expresso pela fórmula geral do tipo “ $e_n = a \cdot (V_n)^b$ ”.

Para determinação do valor de “ $e_n$ ” para o prego anelado 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ) foi empregado o diagrama carga-deslocamento apresentado na Figura 56. A partir dos resultados experimentais realizou-se análise de regressão conforme demonstrado na Figura 57.



**Figura 57** – Análise de regressão para determinação do deslizamento de pregos anelados 2,7x70.

Ajustando a expressão da Figura 57 em função dos esforços de cisalhamento atuantes no diafragma, temos:

$$e_n = (V_n/938)^{2,4074}$$

Sendo:  $V_n = V/n$

em que:

$V$  = cisalhamento máximo devido às cargas de projeto, N;

$n$  = nº de pregos, aplicados nas chapas de fechamento nas extremidades do diafragma, submetidos ao cisalhamento máximo;

$V_n$  = Cisalhamento atuante em um único prego, N;

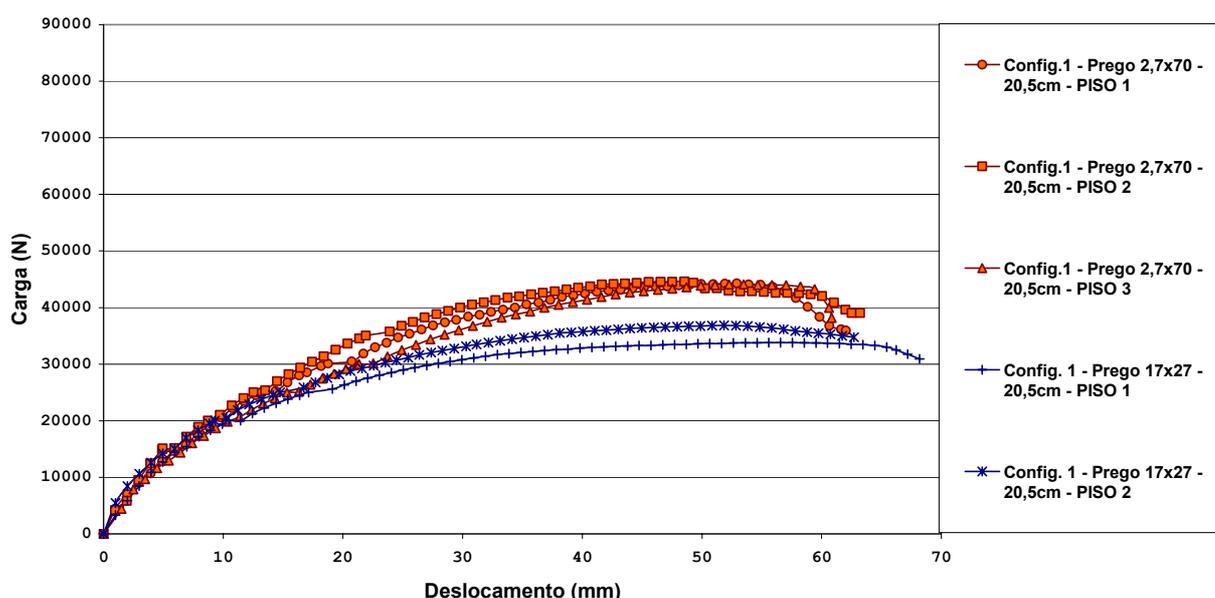
$e_n$  = Deslocamento de um único prego devido ao esforço de cisalhamento, mm.

## 5.5 Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso

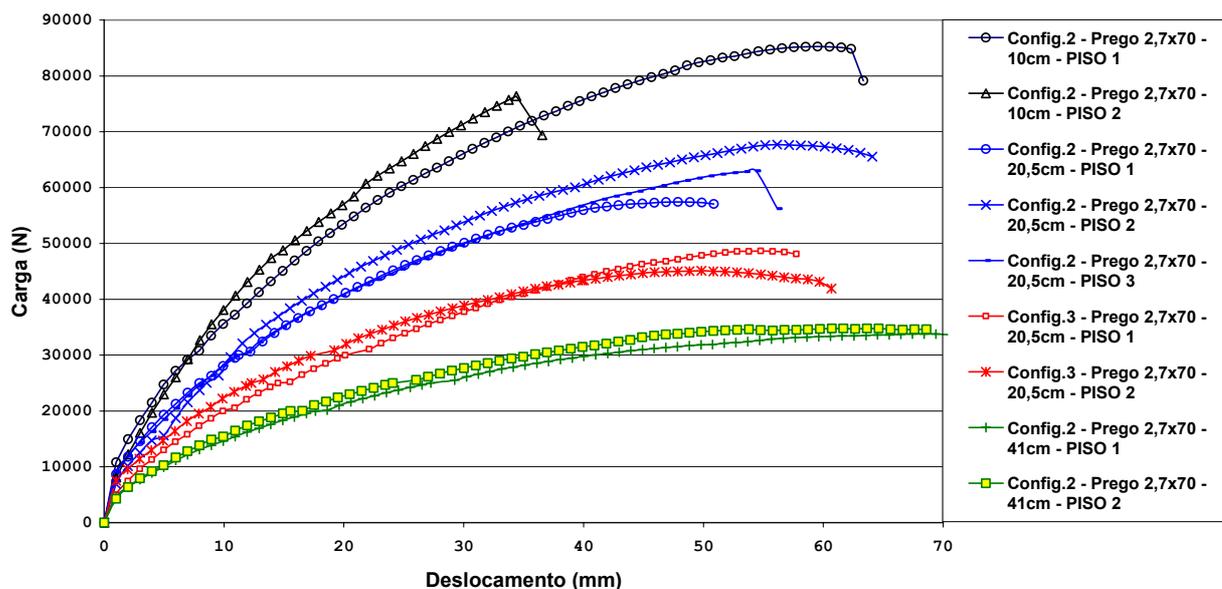
Os protótipos foram ensaiados à flexão, com aplicação de carga no centro do vão, em conformidade com a Norma ASTM E-455(1998) - "*Standard Method for Static Load Testing of Framed Floor and Roof Diaphragm Constructions for Buildings*", conforme descrição apresentada no item 4.5.

Inicialmente foi aplicado uma carga prévia de 5000 N por aproximadamente 1 minuto, aguardando-se 5 minutos após a retirada da carga para ajuste dos mecanismos. Após este período, o ensaio foi conduzido com monitoramento dos deslocamentos e da taxa de aplicação de carga (3000 N/min). Incrementos de carga e descarga a cada 5000 N foi aplicado até o limite de 30000 N, após este 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 58 e 59, 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 intermédio de pregos, respectivamente.



**Figura 58** – Resultados dos protótipos com configuração 1 aos ensaios à flexão.



**Figura 59** – Resultados dos protótipos com configurações 2 e 3 aos ensaios à flexão.

Observa-se na Figura 58 que até o limite de 20000 N, o emprego de pregos lisos 17x27 ( $\phi = 3,0$  mm;  $L = 62,10$  mm), em vez de pregos anelados 2,7x70 ( $\phi = 2,7$ mm;  $L = 70$  mm) não acarretou grandes alterações na rigidez dos protótipos. Entretanto, conforme ilustrado na Figura 60, observa-se que pregos lisos sofrem arrancamento na fase final dos ensaios, fato não observado quando do emprego de pregos anelados.



**Figura 60** – Arrancamento dos pregos lisos, observado ao término do ensaio de flexão.

Não obstante a Figura 59 mostra que a resistência e rigidez dos diafragmas estão diretamente relacionados 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 aos protótipos construídos com a **configuração 1** para o mesmo tipo de prego, quando confrontadas as Figuras 58 e 59.

As Figuras 61 e 62 permitem ilustrar os deslocamentos relativos entre as chapas de fechamento, observado ao término dos ensaios realizados.



**Figura 61** – Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão.



**Figura 62** – Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão.

A finalização dos ensaios ocorreu devido ao escoamento das ligações e conseqüente perda da capacidade de resistência dos protótipos, não sendo observado nenhuma ruptura dos elementos de ossatura, conforme pode ser observado nas Figuras 61 e 62.

### **5.6 - Modelo numérico**

Para a modelagem computacional através do programa SAP-2000 foram empregados os diagramas apresentados nas Figuras 53 a 56 para caracterizar a rigidez e resistência das ligações pregadas dos diafragmas horizontais de piso. Devido à dispersão dos resultados obtidos, fato normalmente observado devido à variabilidade das propriedades físicas e mecânicas da madeira, empregaram-se nas análises as curvas com valores médios, inferiores e superiores entre todos os corpos-de-prova ensaiados.

No modelo computacional, é adotado um comportamento multilinear para caracterização dos elementos de molas. A Tabela 6 e 7 apresentam os valores utilizados para os dois tipos de pregos aplicados na confecção dos protótipos.

**Tabela 7** – Valores para caracterização das ligações, com pregos 17x27, sob a forma de diagrama multilinear.

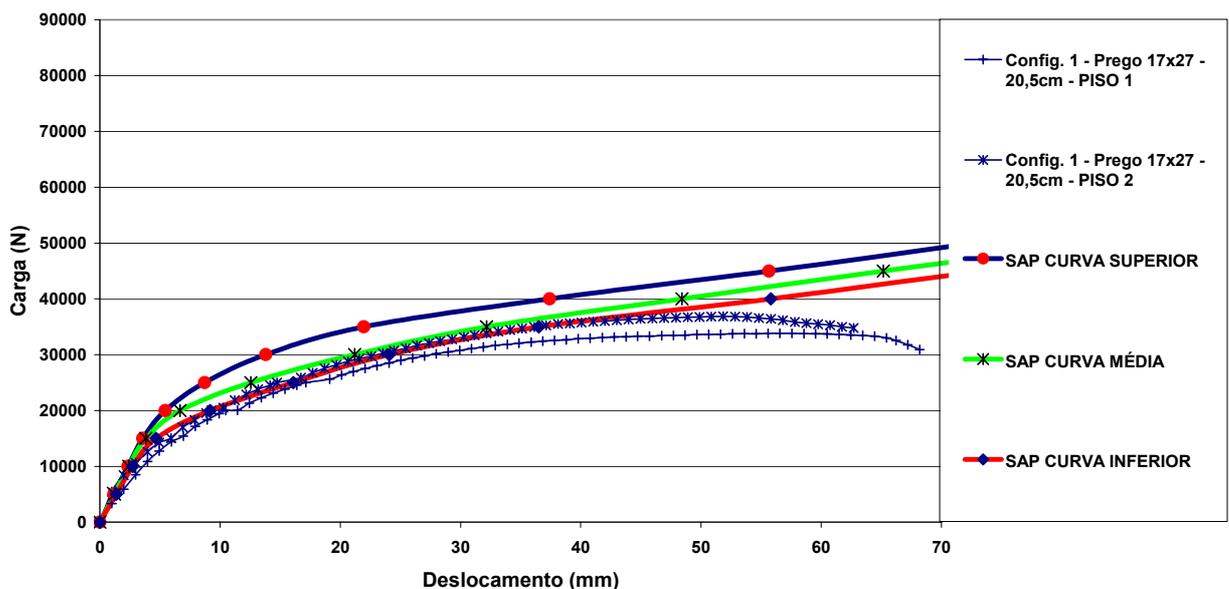
17x27 ( $\phi = 3,0$ mm; L = 62,10 mm)						
Nº	Curva Inferior		Curva Média		Curva Superior	
	Desl.(mm)	Carga(N)	Desl.(mm)	Carga(N)	Desl.(mm)	Carga(N)
1	-20,13	-578,14	-20,09	-746,18	-20,02	-855,93
2	-10,20	-891,70	-15,09	-873,94	-12,04	-1028,49
3	-6,06	-1224,77	-10,15	-1017,24	-8,07	-1232,27
4	-4,07	-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 8** – Valores para caracterização das ligações, com pregos 2,7x70, sob a forma de diagrama multilinear.

2,7x70 ( $\phi = 2,7$ mm; L = 70 mm)						
Nº	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	202,66	0,05	470,44	0,06	286,61
9	1,01	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

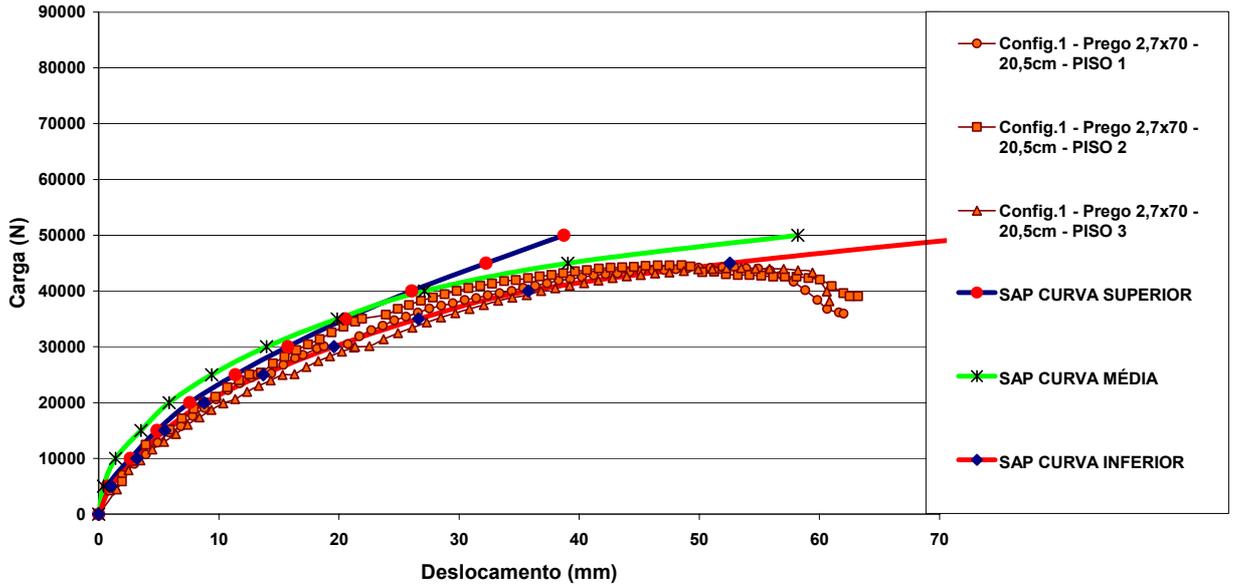
A determinação das propriedades dos materiais necessárias à aplicação do modelo está descrita no item 5.1 e 5.2. Empregou-se o valor de 11130 MPa para o módulo de elasticidade longitudinal (E) do *Pinus sp.* e 795 MPa para o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G), determinado segundo a relação  $G : E \approx 1 : 14$ , proposta por Bodig e Jayne (1992). O módulo de elasticidade na direção vertical para o OSB é de 4840 MPa e o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) é de 1820 MPa.

As comparações entre os resultados numéricos estimados e valores experimentais são apresentadas a seguir, sob a forma gráfica, para as diferentes configurações e densidades de prego. Na Figura 63, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 1 e emprego de pregos 17x27 ( $\phi = 3,0$  mm; L = 62,10 mm), espaçados a cada 20,5 cm .



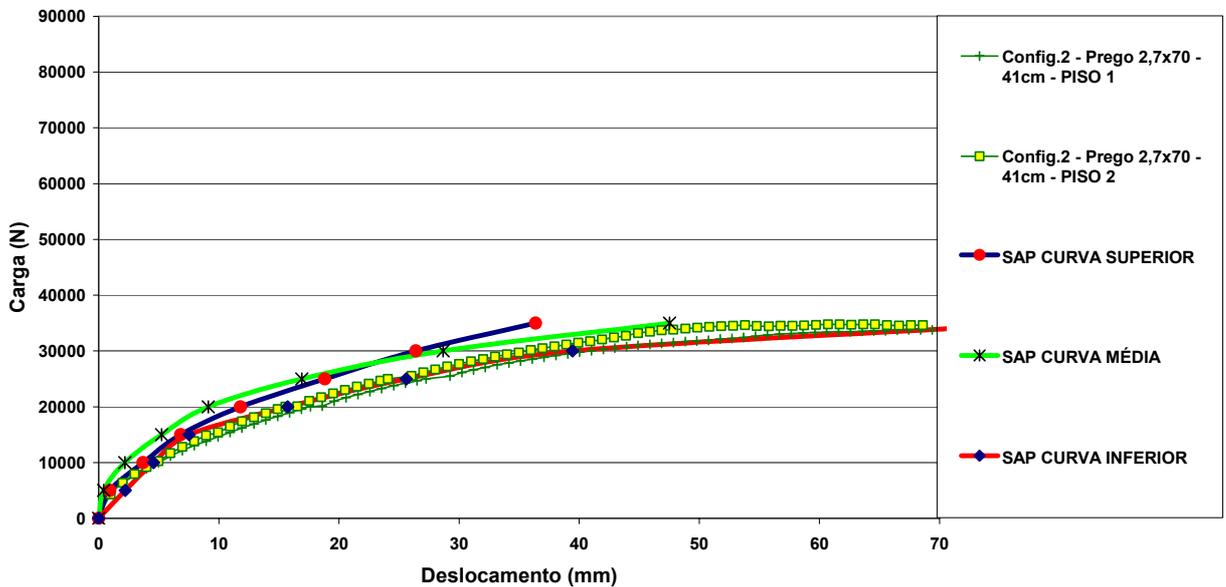
**Figura 63** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 17x27 espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 64, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 1 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7$  mm; L = 70 mm), espaçados a cada 20,5 cm .



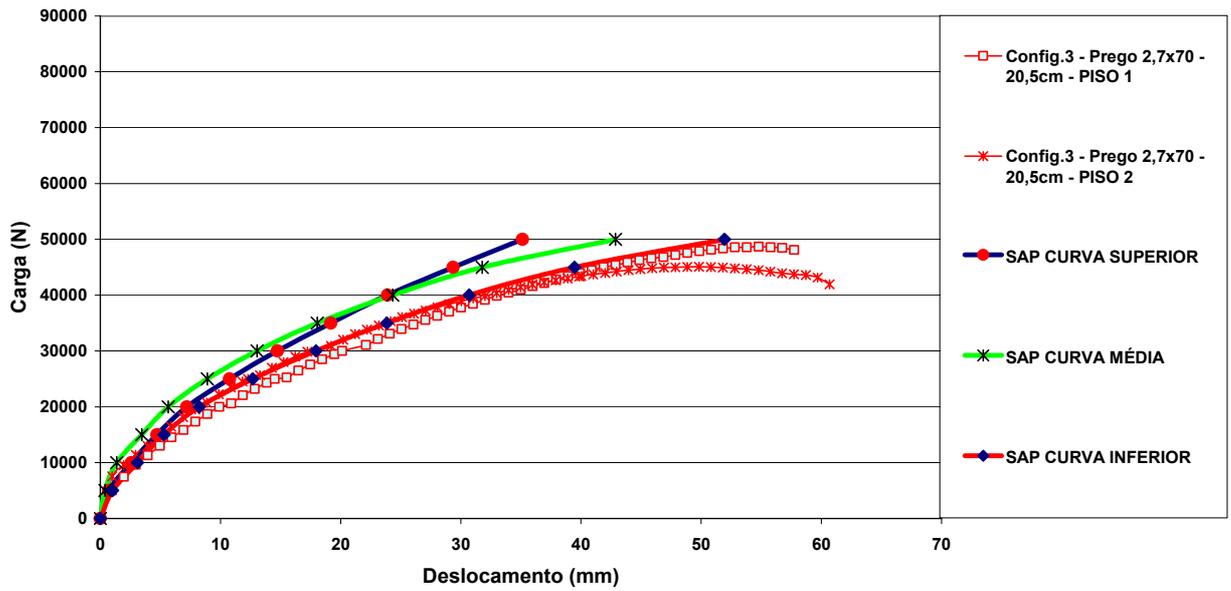
**Figura 64** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 65 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ), espaçados a cada 41 cm.



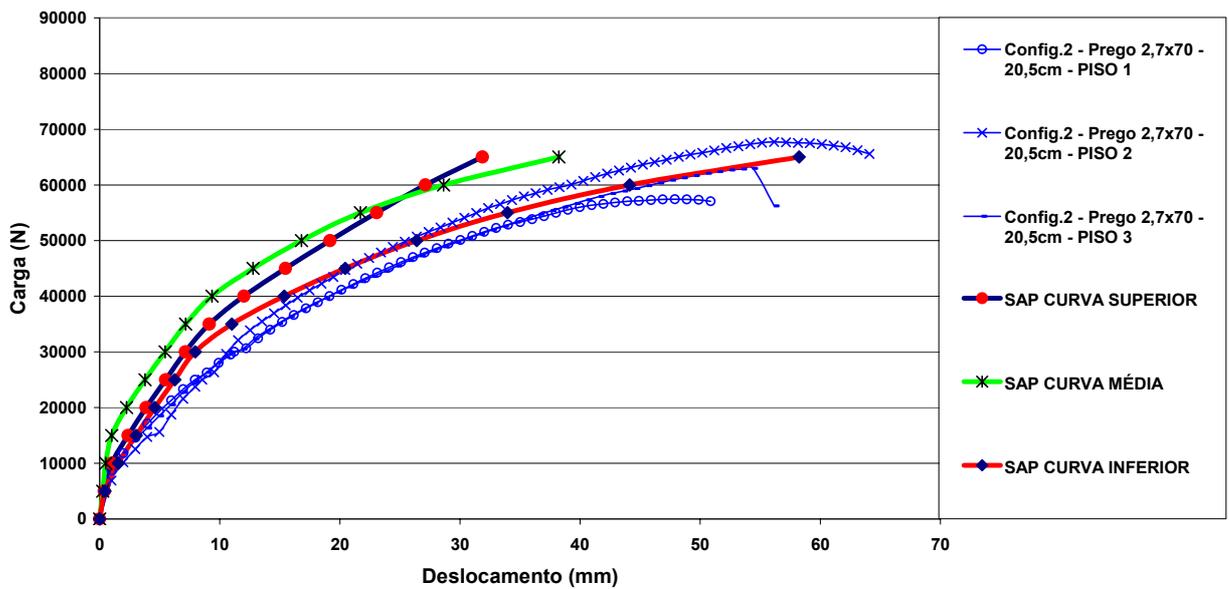
**Figura 65** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 41 cm.

Na Figura 66 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 3 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ), espaçados a cada 20,5 cm.



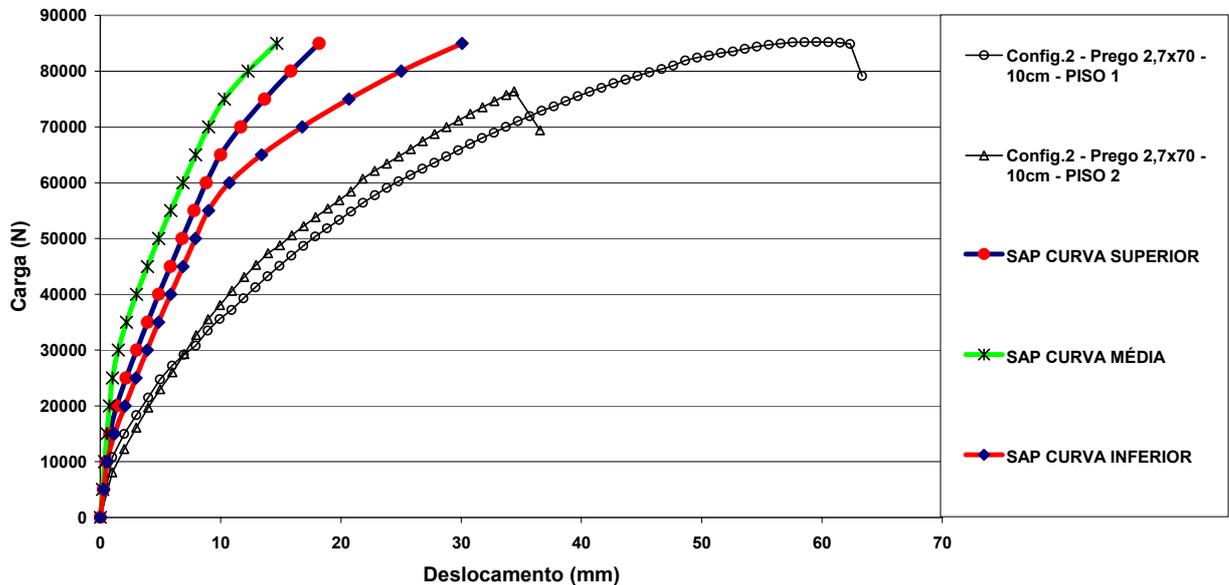
**Figura 66** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 3 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 67 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ), espaçados a cada 20,5 cm.



**Figura 67** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 68 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{mm}$ ), espaçados a cada 10 cm .



**Figura 68** – Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 10 cm.

Observa-se nas Figuras 63 a 67 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 através de ensaios experimentais dos protótipos. Possivelmente, o dispositivo de ensaio utilizado para a caracterização das ligações possa ter causado alguma influência nestes resultados, conforme representação da Figura 28. Nesta Figura, observa-se um anteparo rotativo responsável pela contenção lateral dos corpos de prova durante os ensaios, existe a possibilidade deste mecanismo haver exercido algum efeito de confinamento dos corpos de prova, elevando os resultados dos valores de resistência e rigidez.

O diagrama representativo do limite superior dos ensaios da ligação dos pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{mm}$ ), conforme destacado na Figura 56, embora represente o maior valor de resistência, é superado pelos valores médios de rigidez. Este fato é observado nas Figuras 64 a 68, em que o acréscimo do número de pregos promove redução das solicitações individuais dos mesmos, trabalhando-se mais na fase inicial do diagrama, conduzindo paulatinamente à superação do diagrama representativo do limite superior pelo diagrama representativo dos valores médio.

Na Figura 68 observa-se a discrepância entre os valores numéricos e experimentais. Este fato possivelmente tenha ocorrido devido à ligação das vigas-I aos banzos, uma vez que o modelo numérico às considera rígida. Esta ligação é representada na Figura 36 e considerando que os protótipos em questão empregam de uma elevada quantidade de pregos na fixação das chapas de fechamento, possivelmente tais ligações apresentam um deslocamento adicional que não foi contemplado pelo modelo numérico.

### 5.7 - Modelo analítico

Segundo Skaggs e Martin (2004), Chun e Karacabeyli (2004), Breyer et al. (1998) e Bower (1974), a determinação da deflexão dos protótipos pode ser estimada através da formulação analítica apresentada no item 3.2, no entanto, foram necessárias correções em função da geometria das chapas de OSB ( 0,84 m x 2,50 m ) e da concentração de cargas no carregamento. Desta forma, a equação 1.b apresentada no item 3.2, desconsiderando-se a parcela devido às emendas do banzo, é assim representada:

$$\Delta = \frac{v \cdot L^3}{12 \cdot EAb} + \frac{v \cdot L}{2 \cdot Gt} + 0,0017Le_n$$

em que :

$\Delta$  = Deflexão no centro do diafragma, mm;

$v$  = cisalhamento unitário máximo devido às cargas de projeto, ( $v = V/b$ ), N/mm;

$V$  = cisalhamento máximo devido às cargas de projeto, N;

$L$  = comprimento do diafragma, mm;

$b$  = largura do diafragma, mm;

$E$  = Módulo de elasticidade do material do banzo do diafragma, N/ mm<sup>2</sup>;

$A$  = área da seção do banzo do diafragma, mm<sup>2</sup>;

$G$  = módulo de rigidez das chapas de fechamento, N/ mm<sup>2</sup>;

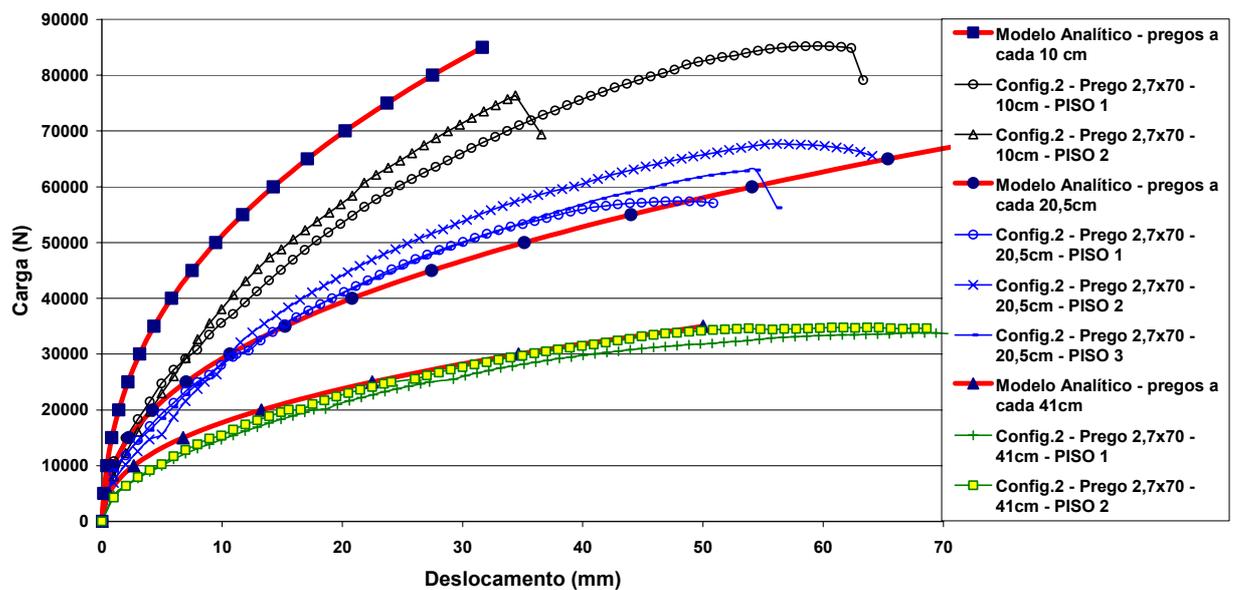
$t$  = espessura efetiva da chapa, mm;

$e_n$  = deformação de um prego para uma determinada carga, mm;

Para o cálculo do termo “ $e_n$ ” empregou-se a expressão apresentada no item 5.4.

Considerando que o modelo em questão é utilizado para estimativas de diafragmas confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos, comparações entre os resultados analíticos e experimentais são apresentadas a seguir, sob a forma gráfica, para as diferentes densidades de prego que seguiram distribuição uniforme.

A Figura 69, apresenta os resultados analíticos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{mm}$ ), espaçados uniformemente.



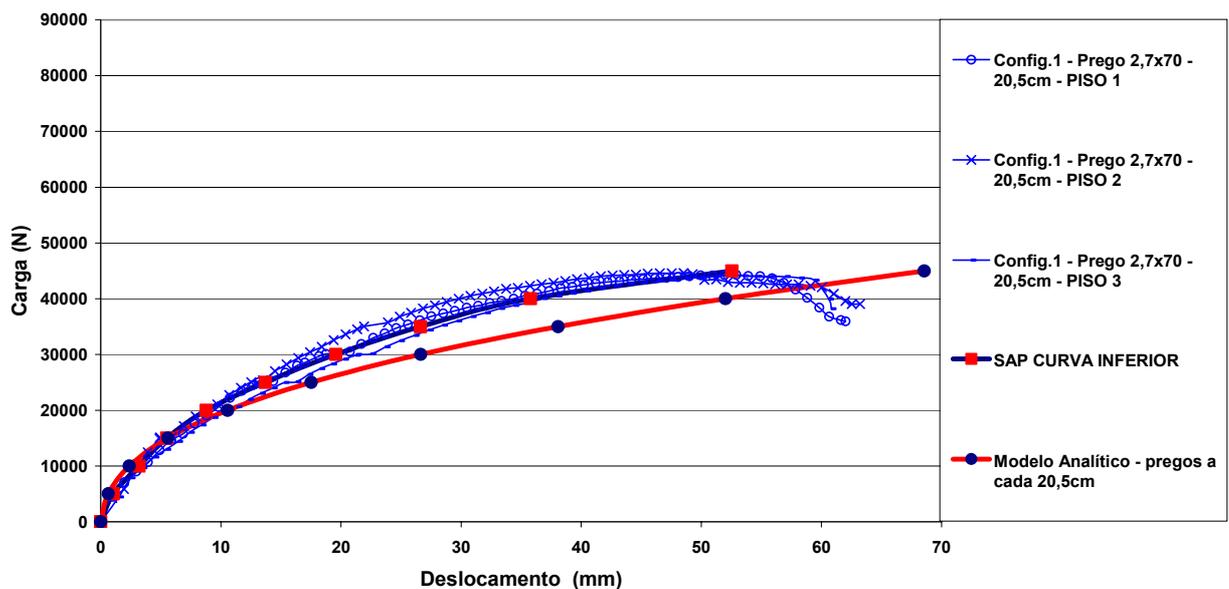
**Figura 69** – Resultados analíticos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70.

O cálculo realizado através do modelo analítico levou em consideração o número de pregos aplicados nas chapas de fechamento nas extremidades do diafragma, submetidos ao cisalhamento máximo. Assim, para determinação do valor de  $V_n$  nos protótipos com espaçamento de 41cm, o número de pregos é igual a 9, para espaçamento de 20,5 cm, o número de pregos é igual a 15 e para espaçamento de 10 cm, o número de pregos é igual a 27.

Observa-se na Figura 69 que a estimativa da deflexão dos protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{mm}$ ), espaçados uniformemente a cada 10 cm, também apresenta discrepância entre os valores analíticos e experimentais. Este fato, corrobora a hipótese de que as ligações entre as vigas-I e os banzos, nestes protótipos, apresentam um deslocamento adicional que não é contemplado no modelo analítico e no modelo numérico, com formulação não linear, desenvolvido através do aplicativo SAP-2000.

A formulação analítica apresentada, é utilizada para o cálculo da flecha máxima de diafragmas confeccionados, com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos. No entanto, ensaios realizados [APA, 1952, 1954, 1955, 1967], citados por APA (2001), sugerem que a deflexão de um diafragma que não emprega elementos enrijecedores é de aproximadamente 2.5 vezes a deflexão calculada de um diafragma construído com dimensões semelhantes e emprego de elementos enrijecedores. Se o diafragma é construído com vigas espaçadas com mais de 0,6 m entre centros, testes indicam um aumento adicional da deflexão de cerca de 20%.

A Figura 70 demonstra o comportamento da aplicação do critério sugerido por APA (2001), para protótipos confeccionados com a configuração 1 e emprego de pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7$  mm;  $L = 70$  mm), espaçados a cada 20,5 cm. Estabelecendo comparações entre resultados experimentais, os resultados obtidos através do modelo analítico e o modelo computacional desenvolvido por meio do Método dos Elementos Finitos, gerados pelo aplicativo SAP 2000.

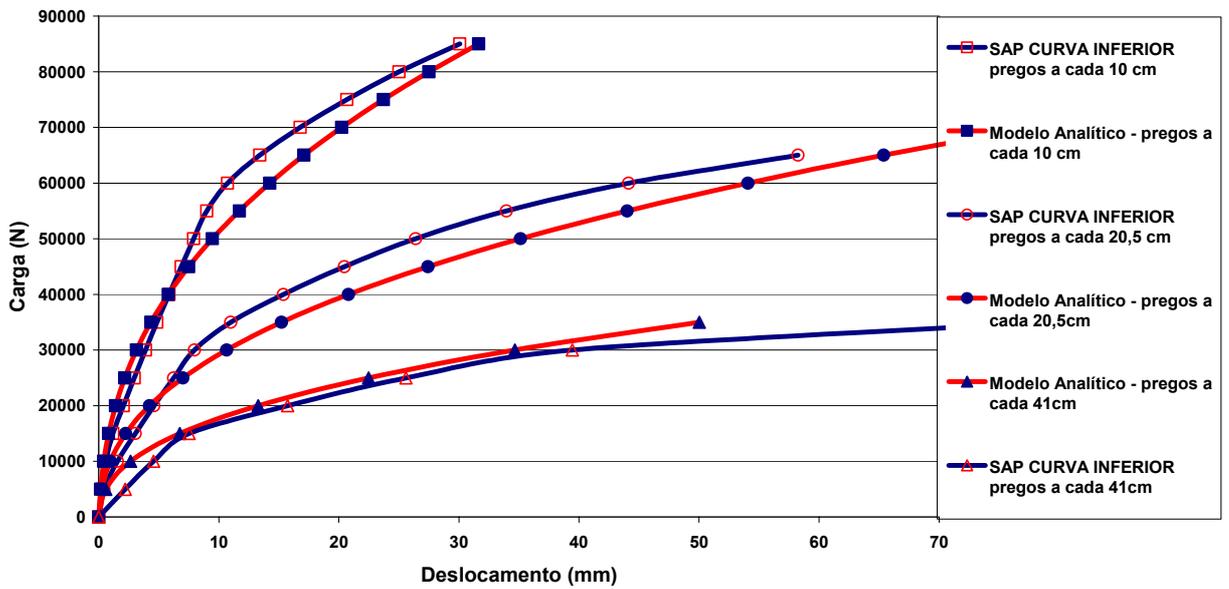


**Figura 70** – Comparações entre resultados experimentais, numéricos do SAP-2000 e do modelo analítico para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5cm.

A Figura 70 mostra que a deflexão calculada para um diafragma construído com dimensões semelhantes e emprego de elementos enrijecedores, majorada de aproximadamente 2.5 vezes, conduz a resultados bastante satisfatórios para prever a deflexão de diafragmas que não empregam elementos enrijecedores.

Comparações com protótipos confeccionados segundo a configuração 2 e empregando pregos 2,7x70 ( $\phi = 2,7$ mm;  $L = 70$  mm) espaçados uniformemente, é apresentada na Figura 71.

Além disso estabelece relações entre os resultados obtidos através do modelo analítico e o modelo computacional desenvolvido por meio do Método dos Elementos Finitos, gerados pelo aplicativo SAP 2000. Nesta Figura, verifica-se que os resultados obtidos através de ambos os modelos são muito próximos, indicando que o emprego da formulação analítica permite estimativas de deflexão de forma rápida e relativamente precisa em comparação com modelos mais sofisticados.



**Figura 71** – Resultados do SAP-2000 e modelo analítico para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70, espaçados a cada 10 cm, 20,5 cm e 41 cm de forma uniforme.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A seguir, enumeramos as conclusões pertinentes a este trabalho e apresentamos algumas recomendações para futuros estudos sobre o comportamento de diafragmas horizontais construídos em sistemas leves de madeira:

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 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 canteiro de obras.

A madeira maciça de *Pinus sp.* requer pré-classificação para emprego estrutural 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*, demonstrou viabilidade para emprego estrutural por apresentar 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 – *Oriented Strand Board*, conforme descrição apresentada neste trabalho, demonstrou ser uma excelente alternativa estrutural de fácil fabricação, fácil transporte e elevada relação resistência/peso próprio.

Ligações pregadas realizadas entre chapas de OSB – *Oriented Strand Board* e barrotes de pinos apresentaram resistência média de 1750 N para pregos anelados de 2,7x70 ( $\phi = 2,7\text{mm}$ ;  $L = 70\text{ mm}$ ) e 1250 N para pregos lisos 17x27 ( $\phi = 3,0\text{ mm}$ ;  $L = 62,10\text{ mm}$ ). O distanciamento de 13 mm da borda é suficiente para que não ocorra rasgamento das chapas nestes níveis de carga, em chapas de 18 mm de espessura. Os resultados de ensaios deste 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 realização dos ensaios em protótipos, é adequado quando se deseja conhecer a resistência e rigidez de diafragmas horizontais solicitados lateralmente para empregar no dimensionamento de obras idênticas. No entanto, por este critério, é possível determinar somente o Módulo de Elasticidade Aparente ao

Cisalhamento e não é possível determinar valores parcelados devido aos esforços de flexão do banzo, cisalhamento da alma e deslizamento das emendas.

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

Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho, no 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 rigidez, observados em ensaios de ligações. Isto demonstra, que o dispositivo de ensaio empregado para determinação da resistência e rigidez das ligações, possivelmente, influenciou na elevação da média dos valores obtidos.

A formulação desenvolvida pela *American Plywood Association-APA*, apresentada no item 3.2, permite estimar a deflexão de diafragmas confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos. A formula permite determinar os valores parcelados devido aos esforços de flexão no banzo, cisalhamento da alma e deslizamento das emendas, os resultados obtidos representam estimativas bastante semelhantes aos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho.

Foi confirmada a indicação da APA (2001), para o exemplo realizado neste trabalho, que a deflexão de um diafragma que não emprega elementos enrijecedores é de aproximadamente 2.5 vezes à deflexão calculada de um diafragma construído com dimensões semelhantes e emprego de elementos enrijecedores.

Dos ensaios realizados conclui-se que a resistência e rigidez dos diafragmas está diretamente relacionada 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, este acréscimo é responsável pelo aumento da resistência e rigidez, não se comprovando a afirmativa de Falk e Itani (1989), que diafragmas que empregam elementos enrijecedores apresentam maior rigidez em função da armação adicional conferida por estes elementos.

Dentre 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.

Sugere-se portanto, o emprego de elementos enrijecedores nos projetos de diafragmas horizontais de pisos solicitados lateralmente. Tais elementos são de fácil execução e possibilita

significativa elevação da capacidade resistente, conferindo maior estabilidade ao conjunto devido ao emprego de um maior número de pregos.

Dentre os aspectos observados, durante a realização deste trabalho, e que poderão orientar a realização de trabalhos futuros destacamos a necessidade de avaliação mais minuciosa da influência das ligações dos diafragmas horizontais às paredes estruturais, neste trabalho representado pela ligação das vigas-I aos banzos, conforme ilustrado na Figura 36. Observou-se, conforme discussão apresentada no texto, que com emprego de densidades maiores de pregos estas ligações são mais solicitadas e, por representar valores adicionais à deflexão do diafragma, necessitam ser investigadas.

Quanto aos resultados dos ensaios de ligação aqui apresentados, verifica-se a necessidade de estudos capazes de avaliar a eficiência do mecanismo de ensaio proposto pela norma norte-americana ASTM D-1761 (2000) - *Standard test methods for mechanical fasteners in wood*.

Sugerimos, também, avaliação dos diafragmas horizontais de piso quanto ao desempenho acústico e na propagação de vibrações, tendo em vista tratar-se de estruturas leves. Estudos desta natureza permitirão maior grau de confiabilidade quando do emprego deste sistema construtivo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### 7.1 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira. ABNT. Rio de Janeiro.

AWC (1996) - AMERICAN WOOD COUNCIL AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. Manual For Engineered Wood Construction. [citado 14 novembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.awc.org>

AMERICAN WOOD COUNCIL (2002). AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. Wood Frame Construction Manual 2001 (WFCM). [citado 14 novembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.awc.org>

ANTON TENWOLDE. Overview of the Research Demonstration House at the USDA Forest Products Laboratory: Partnering to Build a Better Home for the Future. Presented at the 3rd Annual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Wood-Frame Housing, October 29-31, 2001. Madison, WI. [citado 03 Julho 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.forestprod.org/Tenwolde.pdf>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1989). *D 2719-89: Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness*. ASTM. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). *D 3043-95: Standard methods of testing structural panels in flexure*. ASTM. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). *D 4761-96: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material*. ASTM. Philadelphia.

ASTM E-455(1998) - American Society of Testing and Materials (ASTM), *Standard Method for Static Load Testing of Framed Floor and Roof Diaphragm Constructions for Buildings*.

ASTM D 1761-88(2000) AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM), *“Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood”*.

APA - The Engineered Wood Association. 1997. Panel Handbook & Grade Glossary [online], APA - The Engineered Wood Association, Engineered Wood Systems, Tacoma, WA. [citado 20 maio 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.apawood.org/pdfs/managed/X505-R.pdf>

APA - The Engineered Wood Association. 2000. I-Joists for Residential Floors – Design/Construction Guide, APA - The Engineered Wood Association, Engineered Wood Systems, Tacoma, WA. [citado 10 outubro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.apawood.org/pdfs/managed/X710-C.pdf>

APA - The Engineered Wood Association. 2000. Wood Structural Panel Shear Wall Deflection Formula, Technical Topics, Tacoma, WA. [citado 28 outubro 2004], Disponível na World Wide Web: [http://www.apawood.org/level\\_c.cfm?content=pub\\_tch\\_libmain](http://www.apawood.org/level_c.cfm?content=pub_tch_libmain)

- APA - The Engineered Wood Association. 2001. Deflection of Unblocked Wood Structural Panel Diaphragms, Technical Topics, Tacoma, WA. [citado 28 outubro 2004], Disponível na World Wide Web: [http://www.apawood.org/level\\_c.cfm?content=pub\\_tch\\_libmain](http://www.apawood.org/level_c.cfm?content=pub_tch_libmain)
- ATC – Applied Technology Council. *Guidelines for Design of Horizontal Wood Diaphragms* (ATC-7), Redwood City, CA. 1981.
- BREYER, D.E., FRIDLEY, K.J., COBEEN K.E. *Design of Wood Structures ASD*. McGraw-Hill Book Company, New York , N.Y. 1998. 4 th ed.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. (1992). *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger Publishing Company. Malabar, Flórida.
- BOHN, A.R., BECKER, T., DELA JUSTINA, J.D. Apresentação e Análise do Programa Florestal Catarinense, In: Encontro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 8, 2002, Uberlândia, **Anais**. . . Uberlândia: FECIV/UFU, 2002. p.115.
- BOWER, W.H. Lateral Analysis of Plywood Diaphragms. *Journal of Structural Division*, Vol. 100(ST4):759-772; 1974.
- CHUN, N. e KARACABEYLI, E. Deflection of Nailed Shearwalls and Diaphragms. In: WCTE World Conferences on Timber Engineering, 8th, 2004, Finland, **Anais**. . . Lahti: RIL/VTI, 2004. V.IIIb, p.275-278.
- CINTRAFOR NEWS - CENTER FOR INTERNATIONAL TRADE IN FOREST PRODUCTS. CINTRAFOR News 13(1), Spring 1998. [citado 11 novembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/nltr/nltr0698.htm#WT/EWP>
- CUREe - Caltech Woodframe Project Newsletter, nº.1, California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREe). November, 1998. [citado 17 Outubro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.curee.org/publications/project-wf/news/woodnews.html>
- CUREe - California Universities For Research In Earthquake Engineering. Task 1.4.2 – Design Methodology for Diaphragms, J. Daniel Dolan and W. Samuel Easterling. 2001. [citado 13 agosto 2002], Disponível na World Wide Web: [http://www.curee.org/projects/woodframe\\_project/element1/task\\_summaries/task\\_1\\_4\\_2.html](http://www.curee.org/projects/woodframe_project/element1/task_summaries/task_1_4_2.html)
- EINSFELD, R.A., MURRAY, D.W., CHENG, J.J.R. e BACH, L. Manufatura e Características dos Painéis OSB (Oriented Strand Board), In: Encontro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 6, 1998, Florianópolis, **Anais**. . .Florianópolis: UFSC-LEE, 1998. V.3, p.385-393.
- EINSFELD, R.A. e 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.
- EINSFELD, R.A., MURRAY, D.W., CHENG, J.J.R. e BACH, L. Construção de Unidades Residenciais no Sistema de Estruturas Leves de Madeira, In: Encontro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 6, 1998, Florianópolis, **Anais**. . .Florianópolis: UFSC-LEE, 1998. V.4, p.81-91.
- FALK, R.H. e ITANI, R.Y. Finite Element Modeling of Wood Diaphragms. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115(3):543-559; 1989.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit habitacional no Brasil 2000 / Fundação João Pinheiro, Centro de Estatística e Informações. - Belo Horizonte, 2001.200p. (Relatório de Pesquisa), [citado 06 Setembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.pbqp-h.gov.br/deficit2000/apresentacao.htm>

GUITARD, D. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues-editions. France. 1987.

GONÇALVES, R. R., O Déficit Habitacional Brasileiro: Um Mapeamento por Unidades da Federação e por Níveis de Renda Domiciliar. [online], IPEA, abril 1998 (Texto para Discussão, 559). [citado 05 Setembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.ipea.gov.br/pub/td/td0559.pdf>

ILLINOIS EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Companion manual to the windstorm mitigation manual for light frame construction. Julho, 2000. [citado 12 Abril 2003], Disponível na World Wide Web: [http://www.state.il.us/iema/comp\\_manual.pdf](http://www.state.il.us/iema/comp_manual.pdf)

KAMIYA, F. Horizontal Plywood Sheathed Diaphragms With Openings Static Loading Tests and Analysis. International Timber Engineering Conference. Tokyo, October, 1990: p.502-509.

LIMA, A.L., SZÜCS, C.A. e LA ROVERE, H.L. 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.

MARTINEZ, R. A. e MARTITEGUI, F. A. Estructuras de Madera, Diseño y calculo. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho – AITIM. Ed. Gráficas Palermo, S.L. Madrid. 1996. 691p.

MCCUTCHEON, W.J. Stiffness of framing members with partial composite action. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112(7):1623-1637; 1986.

NORTHERN ARIZONA UNIVERSITY, College of Engineering and Technology Fall, 2000. Course Syllabus, Schedule, And Assignments for CENE 437-Wood & Masonry Design. [citado 04 Julho 2002], Disponível na World Wide Web: <http://jan.ucc.nau.edu/~dsl/egr437/class/diaphragms.html>

PATH, PARTNERSHIP FOR ADVANCING TECHNOLOGY IN HOUSING. 2002. Design, Frabrication, and Installation of Engineered Panelized Walls: Two Case Studies. [online], U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research Washington, DC. Contract No. C-OPC-21289, [citado 01 Julho 2002], Disponível na World Wide Web: [http://www.pathnet.org/publications/pdf/pwalls\\_studies\\_full.pdf](http://www.pathnet.org/publications/pdf/pwalls_studies_full.pdf)

PATH, PARTNERSHIP FOR ADVANCING TECHNOLOGY IN HOUSING. 1998 Building Innovation for Homeownership. [online], U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research Washington, DC. Contract DU100C000005956, [citado 09 Setembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.pathnet.org/publications/bih.pdf>

PFS RESEARCH FOUNDATION. OSB Design and Construction Guide, OSB Guide — Part 2. PFS Research Foundation. Madison, USA. March, 2000. [citado 09 Setembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.pfsrf.org/prf/pdf/PlyGuide2.pdf>

SANTOS, A.C., DIAS, G.L., STRIANI, C.S. e SZÜCS, C.A. 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.

SALENIKOVICH, A. The racking performance of light-frame shear walls. Tese de doutorado. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA, 2000.

SHERWOOD, G.E. e MOODY, R. C. Light-frame wall and floor systems - analysis and performance, General Technical Report FPL-GTR-59, United States Department of Agriculture, Forest Service Forest Products Laboratory, (1989). [citado 10 junho 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr59.pdf>

SKAGGS, T.D. e MARTIN, Z.A. Estimating Wood Structural Panel Diaphragm and Shear Wall Deflection. ASCE – Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 9, nº 3, August 2004, pp.136-141.

SOUTHERN PINE COUNCIL. Pressure-Treated Southern Pine. 1999. [citado 24 Setembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://store.southernpine.com/images/ref300.pdf>

STAMATO, G. C. Ligações em Estruturas de Madeira Composta por Chapas de Madeira. São Carlos, 2002. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 159p.

VELOSO, L.A.C.M. e 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.

## 7.2 Obras não referenciadas

AS 1684.1 – (1999) STANDARDS AUSTRALIA INTERNATIONAL, *Residential Timber-Framed Construction*.

ASTM D5055 - (1997) AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM), *Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists*.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. *Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* EUROCODE 5. Bruxelas: CEN. 110p. 1993.

PS 2-92 APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, *Performance Standard for Wood-Based Structural-use Panels*.