

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAREDES ESTRUTURAIS DE SISTEMA  
LEVE EM MADEIRA (SISTEMA PLATAFORMA) SUBMETIDAS A  
FORÇA HORIZONTAL NO 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.

GUSTAVO LACERDA DIAS

Florianópolis, abril de 2005.

“ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAREDES ESTRUTURAIS DE SISTEMA LEVE EM  
MADEIRA (SISTEMA PLATAFORMA) SUBMETIDAS A FORÇA HORIZONTAL NO SEU  
PLANO”

GUSTAVO LACERDA DIAS

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. Dr. Henriette Lebre La Rovere – Coordenadora do PPGEC

---

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Francisco Antônio Romero Gesualdo – UFU

---

Prof. Dr. Guilherme Corrêa Stamato - UNESP

---

Prof. Dr. Humberto Ramos Roman, Ph.D. – ECV/UFSC

---

Prof. Dr. Henriette Lebre La Rovère, Ph.D. – ECV/UFSC

---

Prof. Dr. Poliana Dias de Moraes – ECV/UFSC

A Silvana,  
minha amada esposa,  
a quem tanto admiro.

A Marcos, a quem tenho como filho, e Susana,  
por me darem o prazer do convívio diário.

E a toda a família em Minas Gerais e Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela existência.

A meus pais, pela educação e pelo exemplo de honestidade.

Ao professor Carlos Alberto Szücs, pela amizade e agradável convivência de longa data, a quem devo o aprimoramento de meus conhecimentos no campo das Estruturas de Madeira.

Aos companheiros de pós-graduação Altevir Castro dos Santos e André Luiz Lima, pelo contato agradável nestes anos e pela ajuda mútua no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa, e a Joana Geraldi Velloso, pela cordialidade e presteza para resolver as solicitações cotidianas junto ao GIEM.

Aos bolsistas Caroline Striani Strutzel, William Pescador e Rafael Andrigheto, e aos alunos Demian Andrade, Daniela Matschulat Ely e Maria Fernanda Spernau pelo valioso e indispensável auxílio na execução da etapa experimental em laboratório.

Ao funcionário Edi Assini Júnior, pelo apoio na confecção de peças metálicas e montagem dos dispositivos de ensaio.

Ao GIEM – Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira – e ao LEE – Laboratório de Experimentação em Estruturas – por fornecerem a infra-estrutura para o desenvolvimento dos trabalhos.

A todos os professores da UFSC que contribuíram para o enriquecimento da pesquisa.

À MASISA DO BRASIL, pelo fornecimento das chapas de OSB.

À empresa BATTISTELA IND. E COM. LTDA, pelo fornecimento do lote de madeira de Pinus spp.

À empresa CIM DO BRASIL, pelo fornecimento dos pregos em rolo para pregadeira pneumática.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo aporte financeiro na forma de bolsa de doutorado.

## SUMÁRIO

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| SUMÁRIO.....                                                    | i   |
| LISTA DE TABELAS .....                                          | x   |
| LISTA DE FIGURAS .....                                          | xii |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                               | 1   |
| 1.1 AS EDIFICAÇÕES EM MADEIRA NO BRASIL .....                   | 1   |
| 1.2 POR QUE CONSTRUIR EM MADEIRA? .....                         | 3   |
| 1.3 O SISTEMA PLATAFORMA ( <i>Platform System</i> ) .....       | 5   |
| 1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....                     | 8   |
| 1.5 DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO .....                                | 10  |
| 1.5.1 Objetivo Geral .....                                      | 11  |
| 1.5.2 Objetivos Específicos .....                               | 12  |
| 2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA PLATAFORMA.....                       | 13  |
| 2.1 TIPOLOGIA CONSTRUTIVA.....                                  | 13  |
| 2.1.1 Concepção das Fundações.....                              | 15  |
| 2.1.2 Composição dos Elementos de Parede .....                  | 16  |
| 2.1.2.1 Ossatura em Madeira.....                                | 16  |
| 2.1.2.2 Formas de Fixação dos Painéis de Parede à Fundação..... | 19  |
| 2.1.2.3 Aberturas de Portas e Janelas .....                     | 22  |
| 2.1.2.4 Chapas para Fechamento das Paredes .....                | 24  |
| 2.1.3 Composição dos Elementos de Piso .....                    | 26  |
| 2.2 DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS ATRAVÉS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS   | 28  |
| 2.2.1 Ação de Forças Verticais.....                             | 29  |

|         |                                                                                      |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.1.1 | Solicitações Verticais nos Elementos de Piso .....                                   | 29 |
| 2.2.1.2 | Forças Verticais nos Elementos de Parede .....                                       | 30 |
| 2.2.2   | Ação de Forças Horizontais .....                                                     | 32 |
| 2.2.2.1 | Paredes Transversais à Direção do Vento .....                                        | 33 |
| 2.2.2.2 | Estrutura de Piso .....                                                              | 34 |
| 2.2.2.3 | Paredes Estruturais (paralelas à direção do vento) .....                             | 36 |
| 3       | COMPORTAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS .....                                          | 38 |
| 3.1     | NÍVEIS DE ANCORAGEM E FIXAÇÃO DA PAREDE LATERAL .....                                | 44 |
| 3.2     | PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS ..... | 45 |
| 3.2.1   | Comprimento das Paredes .....                                                        | 45 |
| 3.2.2   | Fixação e Ancoragem dos Painéis de Parede à Fundação .....                           | 46 |
| 3.2.3   | Presença de Aberturas de Portas e Janelas .....                                      | 47 |
| 3.2.4   | Orientação das Chapas de Fechamento .....                                            | 48 |
| 3.2.5   | Densidade de Pregos .....                                                            | 49 |
| 3.2.6   | Resistência e Rigidez da Ligação Pregada .....                                       | 50 |
| 3.2.7   | Espaçamento entre Montantes e Espessura da Chapa de Fechamento .....                 | 51 |
| 3.2.8   | Tipo da Chapa de Fechamento .....                                                    | 51 |
| 3.3     | MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS .....                             | 53 |
| 3.3.1   | Modelo do EUROCODE 5 .....                                                           | 54 |
| 3.3.2   | Modelo de Sugiyama .....                                                             | 55 |
| 3.3.3   | Modelo Analítico de NI e KARACABEYLI .....                                           | 59 |

|         |                                                        |    |
|---------|--------------------------------------------------------|----|
| 3.3.4   | Modelo Empírico de NI e KARACABEYLI .....              | 61 |
| 3.3.5   | Cálculo do Deslocamento de Topo da Parede .....        | 62 |
| 4       | METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL .....          | 64 |
| 4.1     | PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....                        | 65 |
| 4.1.1   | Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira .....      | 65 |
| 4.1.2   | Propriedades Mecânicas das Chapas de Fechamento.....   | 67 |
| 4.1.3   | Ensaio das Ligações Pregadas .....                     | 70 |
| 4.1.3.1 | Norma de Ensaio .....                                  | 70 |
| 4.1.3.2 | Definição dos Parâmetros de Desempenho da Ligação..... | 72 |
| 4.1.3.3 | Definição dos Materiais e Medidas .....                | 72 |
| 4.1.3.4 | Amostras das Peças de Madeira da Ossatura.....         | 72 |
| 4.1.3.5 | Amostras da Chapa de Fechamento.....                   | 73 |
| 4.1.3.6 | Tipo e Tamanho dos Pregos .....                        | 73 |
| 4.1.3.7 | Outras Considerações .....                             | 76 |
| 4.1.3.8 | Configuração dos corpos-de-prova.....                  | 77 |
| 4.1.3.9 | Resultado do Ensaio das Ligações .....                 | 78 |
| 4.2     | ENSAIO DOS PROTÓTIPOS DE PAREDE .....                  | 82 |
| 4.2.1   | Norma de Ensaio .....                                  | 82 |
| 4.2.2   | Dispositivos de Ensaio .....                           | 83 |
| 4.2.2.1 | Procedimentos de Ensaio.....                           | 84 |
| 4.2.2.2 | Instrumentação .....                                   | 85 |

|         |                                                                                   |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.3   | Definição dos Parâmetros de Desempenho das Paredes Estruturais .....              | 86  |
| 4.2.4   | Especificação de Materiais e Medidas.....                                         | 87  |
| 4.2.5   | Configuração dos Protótipos de Parede.....                                        | 89  |
| 5       | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                      | 91  |
| 5.1     | CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                                                       | 91  |
| 5.1.1   | Ancoragem das Paredes.....                                                        | 91  |
| 5.1.2   | Estimativa da Força Máxima.....                                                   | 93  |
| 5.1.3   | Seqüência de Montagem.....                                                        | 93  |
| 5.1.4   | Forma de Realização dos Ensaios e Expressão dos Resultados .....                  | 95  |
| 5.2     | RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS .....                                              | 96  |
| 5.2.1   | Variação do tipo de prego.....                                                    | 96  |
| 5.2.1.1 | Diagrama força-deslocamento.....                                                  | 96  |
| 5.2.1.2 | Parâmetros de desempenho .....                                                    | 98  |
| 5.2.1.3 | Comportamento Geral e Modo de Ruptura .....                                       | 99  |
| 5.2.1.4 | Determinação das Solicitações e Deslocamentos a partir dos Modelos de Cálculo 101 |     |
| 5.2.2   | Variação do comprimento das paredes.....                                          | 102 |
| 5.2.2.1 | Diagrama força-deslocamento.....                                                  | 102 |
| 5.2.2.2 | Parâmetros de desempenho .....                                                    | 104 |
| 5.2.2.3 | Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo.....                        | 104 |
| 5.2.2.4 | Comportamento Geral e Modo de Ruptura .....                                       | 105 |
| 5.2.3   | Variação da taxa de aberturas.....                                                | 107 |

|         |                                                                              |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.3.1 | Diagrama força-deslocamento .....                                            | 107 |
| 5.2.3.2 | Parâmetros de desempenho .....                                               | 108 |
| 5.2.3.3 | Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo.....                   | 109 |
| 5.2.3.4 | Comportamento Geral e Modo de Ruptura .....                                  | 110 |
| 5.2.4   | Variação do nível de ancoragem e fixação .....                               | 112 |
| 5.2.4.1 | Configuração dos Protótipos .....                                            | 112 |
| 5.2.4.2 | Diagrama força-deslocamento .....                                            | 113 |
| 5.2.4.3 | Parâmetros de desempenho .....                                               | 114 |
| 5.2.4.4 | Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo.....                   | 115 |
| 5.2.4.5 | Comportamento Geral e Modo de Ruptura .....                                  | 116 |
| 6       | ANÁLISE NUMÉRICA BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....               | 119 |
| 6.1     | Descrição do modelo desenvolvido .....                                       | 119 |
| 6.2     | Resultados da Análise Numérica e Discussões .....                            | 122 |
| 6.3     | Análise Paramétrica do Deslocamento de Topo da Parede .....                  | 124 |
| 7       | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....                                     | 127 |
| 8       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                             | 131 |
|         | ANEXO I – Estimativa da Resistência e Rigidez dos Protótipos de Parede ..... | 138 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Especificação de pregos para montagem da ossatura de paredes.....                                     | 17  |
| Tabela 2 - Especificação de pregos para união das duas peças da travessa superior .....                          | 19  |
| Tabela 3 – Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento. .... | 51  |
| Tabela 4 - Propriedades físicas da madeira de <i>Pinus spp</i> .....                                             | 65  |
| Tabela 5 - Propriedades mecânicas da madeira de <i>Pinus spp</i> .....                                           | 66  |
| Tabela 6 - Propriedades mecânicas das chapas de OSB – <i>Oriented Strand Board</i> .....                         | 69  |
| Tabela 7 - Relação entre comprimento e diâmetro dos pregos (segundo UBC e GAUZIN-MÜLLER) .....                   | 74  |
| Tabela 8 - Pregos testados no ensaio das ligações. ....                                                          | 75  |
| Tabela 9 - Relação da densidade aparente da madeira empregada no ensaio das ligações.....                        | 78  |
| Tabela 10 - Resumo das propriedades de desempenho das ligações.....                                              | 80  |
| Tabela 11 – Variação da força máxima da ligação segundo as direções paralela e perpendicular. ....               | 81  |
| Tabela 12 - Resumo dos Parâmetros Fixos especificados para os ensaios das paredes .....                          | 88  |
| Tabela 13 - Configuração dos protótipos de parede .....                                                          | 90  |
| Tabela 14 –Ensaio de força lateral numa amostra da ligação pregada do dispositivo de ancoragem.....              | 91  |
| Tabela 15 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação do tipo de prego .....                         | 98  |
| Tabela 16 - Comparativo entre força real e estimada para as paredes P244 e P244-pregoliso ...                    | 101 |
| Tabela 17 - Comparativo entre o deslocamento real e estimado para as paredes P244 e P244-pregoliso .....         | 101 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 18 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação do comprimento .....                                       | 104 |
| Tabela 19 - Comparativo entre força real e prevista para as paredes P244 e P244-pregoliso.....                               | 104 |
| Tabela 20 - Comparativo entre o deslocamento real e estimado para as paredes P244, P366 e P488.....                          | 105 |
| Tabela 21 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação da taxa de aberturas .....                                 | 109 |
| Tabela 22 - Comparativo entre força real e prevista para as paredes P488, P488-1P1J e P488-2J .....                          | 109 |
| Tabela 23 - Parâmetros de desempenho para as paredes totalmente fechadas, com variação do nível de fixação e ancoragem ..... | 114 |
| Tabela 24 - Força real e estimada (modelo matemático de NI e KARACABEYLI, 2000) .....                                        | 115 |
| Tabela 25 - Força real e estimada (modelo empírico de NI e KARACABEYLI, 2000).....                                           | 115 |
| Tabela 26 – Participação percentual das parcelas de deslocamento de topo da parede estrutural. ....                          | 125 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Sistema construtivo em madeira maciça empilhada. Detalhe de área molhada em alvenaria, por desconhecimento das técnicas. ....                                | 2  |
| Figura 2 - Sistema construtivo em tábuas verticais com mata-juntas.....                                                                                                 | 2  |
| Figura 3 - Área plantada com Pinus e Eucaliptus no Brasil (Ha) – ano 2003 (fonte: ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente)..... | 4  |
| Figura 4 - Ilustração mostrando a diferença fundamental entre os sistemas <i>Platform</i> e <i>Balloon-frame</i> (adaptado de ALLEN e THALLON, 2002). ....              | 6  |
| Figura 5 - Ilustrações mostrando a construção de uma edificação em Sistema Plataforma (adaptado de ALLEN e THALLON, 2002).....                                          | 14 |
| Figura 6 - Diferentes soluções para as fundações (adaptado de THALLON, 2000).....                                                                                       | 15 |
| Figura 7 - Ossatura de parede montada sobre estrutura de piso (SÁNCHEZ, 1995).....                                                                                      | 16 |
| Figura 8 - Pregos cravados de topo e em ângulo (adaptado de WOESTE, 2001).....                                                                                          | 17 |
| Figura 9 - Formas alternativas de fixação de um montante vertical à travessa inferior (APA, 2001).....                                                                  | 18 |
| Figura 10 - Diferentes soluções para interseção de paredes (adaptado e THALLON, 2000). ....                                                                             | 18 |
| Figura 11 – Travessa superior simples com cobrajuntas nas emendas. (modificado de THALLON, 2000).....                                                                   | 19 |
| Figura 12- Parafusos de fixação em diferentes tipos de fundação (extraído do WFCM, 1995). .                                                                             | 20 |
| Figura 13 – Travessa inferior simples e travessa inferior dupla.....                                                                                                    | 21 |
| Figura 14 - Ossatura de parede com aberturas de porta e janela.....                                                                                                     | 22 |
| Figura 15 - Diferentes soluções construtivas para compor vergas de portas e janelas (THALLON, 2000).....                                                                | 23 |

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16 - Ossatura simplificada (sem vergas e umbrais) para paredes sem função estrutural, segundo GUERTIN e ARNOLD (2001). .....                                                           | 24 |
| Figura 17 – Disposição horizontal e vertical das chapas de fechamento (extraído de THALLON, 2000). .....                                                                                      | 25 |
| Figura 18 - Aplicação de elementos cerâmicos sobre chapa cimentícia fixada à ossatura em madeira (extraído de THALLON, 1997). .....                                                           | 26 |
| Figura 19 - Tipos mais comuns de seção transversal para as vigotas de piso (extraído e adaptado de <a href="http://www.kmacmn.com">http://www.kmacmn.com</a> , acessado em 23/03/2003). ..... | 27 |
| Figura 20 – Estrutura do elemento de piso, mostrando as vigotas com bloqueadores e as chapas de fechamento (extraído de APA, 1999). .....                                                     | 28 |
| Figura 21 - Relação entre a orientação das chapas e o espaçamento entre vigotas de piso (FAHERTY e WILLIAMSON, 1995) .....                                                                    | 29 |
| Figura 22 – Pontos da ossatura que devem receber atenção no dimensionamento quanto a cargas verticais. ....                                                                                   | 32 |
| Figura 23 - Caminho das forças no sistema Plataforma (adaptado de FAHERTY e WILLIAMSON, 1995). .....                                                                                          | 33 |
| Figura 24 - Esquema da atuação da força lateral no montante (adaptado de Illinois Emergency Managment Agency, 2000). .....                                                                    | 34 |
| Figura 25 - Analogia entre o diafragma de piso e uma viga –I (Illinois Emergency Managment Agency, 2000). .....                                                                               | 35 |
| Figura 26 – Ilustração da distribuição das forças do piso para as paredes estruturais (adaptado de AMBROSE, 1994). .....                                                                      | 37 |
| Figura 27 – Diferentes formas de contraventamento de uma edificação: (a) Paredes estruturais; (b) contraventamento interno; (c) pilar-viga. ....                                              | 38 |
| Figura 28 - Analogia entre a parede lateral e uma viga engastada e livre. ....                                                                                                                | 39 |

|                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29 - Ação da força lateral tendendo a provocar o giro da parede. ....                                                                                                                | 40 |
| Figura 30 - Exemplo de aplicação do dispositivo de ancoragem (obtido de catálogo da empresa <i>The Simpson Co.</i> , Estados Unidos).....                                                   | 40 |
| Figura 31 - Ação da força lateral tendendo a provocar o deslocamento horizontal da parede.....                                                                                              | 42 |
| Figura 32 - Ação da força lateral provocando forças de cisalhamento no plano da parede-diafragma.....                                                                                       | 43 |
| Figura 33 – Diferentes níveis de ancoragem e fixação das paredes estruturais: ancoragem convencional; ancoragem dos montantes extremos; ancoragem de cada segmento plenamente fechado. .... | 44 |
| Figura 34 - Modos de falha da ligação pregada em cisalhamento simples (adaptado de STEWART apud HEINE, 1997 ) .....                                                                         | 50 |
| Figura 35 – Enfoque do Método da Parede Perfurada, mostrando os dispositivos de ancoragem apenas nas extremidades da parede. ....                                                           | 59 |
| Figura 36 - Diagrama do modelo matemático de NI e KARACABEYLI.....                                                                                                                          | 61 |
| Figura 37 - Diagrama do modelo empírico de NI e KARACABEYLI.....                                                                                                                            | 62 |
| Figura 38 - Ensaio de flexão longitudinal da chapa de OSB.....                                                                                                                              | 67 |
| Figura 39 - Ensaio de flexão transversal da chapa de OSB. ....                                                                                                                              | 68 |
| Figura 40 - Ensaio de flexão vertical da chapa de OSB.....                                                                                                                                  | 68 |
| Figura 41 - Ensaio de cisalhamento da chapa de OSB.....                                                                                                                                     | 69 |
| Figura 42 - Dispositivo de ensaio das ligações sugerido pela norma ASTM D-1761 (2000).....                                                                                                  | 71 |
| Figura 43 –Ensaio das ligações (direções paralela e perpendicular às fibras da madeira).....                                                                                                | 71 |
| Figura 44 - Tipos de pregos usados na pesquisa: anelado e liso. ....                                                                                                                        | 75 |

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45 - Rasgamento das chapas na travessa inferior da parede: (a) parede com dispositivo de ancoragem; (b) parede sem dispositivo de ancoragem (extraído de SALENIKOVICH, 2000).....                       | 76 |
| Figura 46 - Configuração dos corpos-de-prova para ensaio das ligações: direção paralela às fibras da madeira (à esquerda) e perpendicular às fibras da madeira (à direita) .....                               | 78 |
| Figura 47 – Curvas médias força-deslocamento do ensaio das ligações para o prego 2,7 x 50 anelado.....                                                                                                         | 79 |
| Figura 48 - Curvas médias força-deslocamento do ensaio das ligações para o prego 16 x 24 liso. ....                                                                                                            | 79 |
| Figura 49 – Curva média do ensaio das ligações para os pregos 2,7x50-anelado e 16x24-liso....                                                                                                                  | 80 |
| Figura 50 – Corpos-de-prova após ensaio de força lateral da ligação pregada. ....                                                                                                                              | 80 |
| Figura 51 – Dispositivo de ensaio das paredes.....                                                                                                                                                             | 84 |
| Figura 52 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento: T1: deslocamento de topo; T2: deslocamento da base; T3: deslocamento do montante tracionado; T4: deslocamento do montante comprimido.....         | 85 |
| Figura 53 – Configuração básica de um dos protótipos de parede, mostrando a ossatura em madeira e a disposição das chapas.....                                                                                 | 89 |
| Figura 54 - Ensaio da ligação pregada para definição da quantidade de pregos no dispositivo de ancoragem. (a) Vista do corpo-de-prova da ligação; (b) Dispositivo de ancoragem preso ao montante extremo. .... | 92 |
| Figura 55 - Ensaio do dispositivo de ancoragem preso a montante duplo através de dez pregos 19x36 liso. ....                                                                                                   | 93 |
| Figura 56 - Seqüência de montagem de um protótipo de parede com duas aberturas de janela. ...                                                                                                                  | 94 |
| Figura 57 - Diagrama força-deslocamento da parede P244-anc-pf. À esquerda, diagrama com as curvas de descarregamento da estrutura. À direita, as curvas são omitidas, para melhor visualização. ....           | 95 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 58 - Vista geral do ensaio da parede P244 .....                                                         | 96  |
| Figura 59 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com 2,44m de comprimento.....                          | 97  |
| Figura 60 – Diferença de comportamento dos pregos 2,7x50 anelado e 16x24 liso no ensaio das ligações. ....     | 97  |
| Figura 61 – Detalhes do ensaio das paredes P244 e P244-pregoliso. ....                                         | 99  |
| Figura 62 – Diagrama mostrando a separação do montante tracionado em função da força na parede. ....           | 100 |
| Figura 63 - Arrancamento dos pregos no protótipo com prego 16x24 liso.....                                     | 100 |
| Figura 64 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com comprimentos de 2,44m, 3,66m e 4,88m. ....         | 102 |
| Figura 65 – Relação entre a variação do comprimento da parede e a força máxima alcançada. ....                 | 103 |
| Figura 66 - Diagrama força-deslocamento em função da força por comprimento.....                                | 103 |
| Figura 67 – Detalhes do ensaio das paredes P488.....                                                           | 106 |
| Figura 68 - Separação semelhante entre as chapas de fechamento junto à base, no ensaio da parede P488. ....    | 106 |
| Figura 69 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com variação da taxa de aberturas. ....                | 108 |
| Figura 70 – Relação entre a variação da taxa de aberturas ( $r$ ) em função da força máxima. ....              | 108 |
| Figura 71 – Ruptura pelo rasgamento das chapas nos cantos de janela nos protótipos P488-2J.....                | 110 |
| Figura 72 – Pequena separação entre chapas próximo à base, para a parede P488-2J.....                          | 110 |
| Figura 73 - Ensaio dos protótipos P488-1P1J. ....                                                              | 111 |
| Figura 74 - Fixação por pregos da segunda travessa inferior à guia previamente presa à base por parafusos..... | 112 |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 75 - Diagrama força-deslocamento para as paredes totalmente fechadas e com variação do nível de fixação e ancoragem. ....                                           | 113 |
| Figura 76 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com aberturas e variação do nível de fixação e ancoragem. ....                                                     | 114 |
| Figura 77 – Rasgamento das chapas e separação do montante tracionado. Acima: protótipos P488-pf; abaixo: protótipos P488-pg.....                                           | 117 |
| Figura 78 - Ensaio dos protótipos P488-2J-pf. À esquerda: movimentação mínima das chapas sob força máxima; ao centro e à direita: rasgamento das chapas de fechamento..... | 118 |
| Figura 79 – Modelo desenvolvido para a parede P488. ....                                                                                                                   | 120 |
| Figura 80 – Detalhe da ligação entre barra da ossatura e chapa de fechamento. ....                                                                                         | 121 |
| Figura 81 – Aproximação da curva força-deslocamento da ligação pregada através de segmentos retilíneos. ....                                                               | 121 |
| Figura 82 – Diagrama força-deslocamento de topo: modelo numérico e experimental.....                                                                                       | 122 |
| Figura 83 – Configuração deformada da ossatura da parede.....                                                                                                              | 123 |
| Figura 84 – Movimentação relativa entre as chapas de fechamento no modelo numérico. ....                                                                                   | 124 |
| Figura 85 – Variação do diagrama força-deslocamento de topo no modelo numérico, ao se variar o Módulo de Elasticidade da Madeira de <i>Pinus</i> . ....                    | 126 |
| Figura 86 - Variação do diagrama força-deslocamento de topo no modelo numérico, ao se variar o Módulo de Elasticidade Transversal da chapa de OSB.....                     | 126 |

## RESUMO

DIAS, Gustavo Lacerda. *Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (Sistema Plataforma) submetidas a força horizontal no seu plano*. Florianópolis, 2005. Tese de doutorado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento de paredes estruturais, componentes do Sistema Plataforma, quando submetidas a força lateral monotônica (ex. ação do vento). Inicialmente é descrito o Sistema Plataforma, ainda pouco difundido e estudado no Brasil, identificando as soluções construtivas mais comumente empregadas em países com maior tradição em construções leves em madeira, mostrando também a função estrutural de cada elemento construtivo, possibilitando uma visão global dos mecanismos de ação das cargas através da edificação. Em seguida, são apresentados os resultados de uma ampla etapa experimental, que abrange ensaios preliminares de caracterização dos materiais utilizados e da ligação pregada entre barrote de madeira de *Pinus sp* e chapa de OSB – *Oriented Strand Board* – e, posteriormente, os ensaios de protótipos de paredes estruturais, em tamanho real, submetidos a carregamento lateral, permitindo o estudo de algumas variáveis importantes que afetam o comportamento estrutural do sistema construtivo. Compara-se a resposta de modelos matemáticos e empíricos para o cálculo da resistência e rigidez das paredes aos resultados experimentais. A análise final dos resultados obtidos abrange uma análise numérica da parede estrutural por meio de programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: parede; madeira; sistema leve; sistema Plataforma; Estruturas de madeira.

## ABSTRACT

This study is focused on the racking resistance of wood light-frame shearwalls (Platform System) under lateral forces (i.e. wind pressure). At first, the Platform system, which is not well known in Brasil, is fully described, showing the most common construction practices used in countries where timber frame construction is more developed. It also presents the structural function of the main components of the building, enabling a global view of the load path through the building. Afterwards, it presents the results of the experimental tests on full scale shearwalls (*Pinus spp* framing and OSB sheathing) subjected to lateral loads to investigate the influence of some important variables affecting shearwall racking capacity. Finally, mathematical and empirical models are validated to predict shearwall resistance and rigidity response, and a Finite Element Model of a wall is developed.

**Keywords:** wood; shearwall; lateral forces; Platform System; wood structures.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 AS EDIFICAÇÕES EM MADEIRA NO BRASIL

As construções em madeira integram a paisagem de algumas regiões do Brasil, com destaque para a região amazônica, devido à vida na floresta, e também para a região Sul, devido à cultura trazida pelos imigrantes europeus que ali se instalaram a partir do século XIX. Porém, este mercado é ainda bastante incipiente em nosso país, apesar da grande vocação madeireira.

Segundo constata BITTENCOURT (1995), as edificações existentes apresentam falta de tecnologia apropriada ao processo construtivo, o que tem gerado o uso inadequado da madeira. Em linhas gerais, há carência de qualidade, modernização e inovação tecnológica. Isto decorre da ausência de domínio das técnicas, dos métodos e dos processos da tecnologia da madeira. Aliado a isto, há ainda a inexistência de elementos normativos capazes de apoiar o profissional no projeto e execução, além da falta de uma indústria madeireira forte e em sintonia com a produção florestal de modo a alavancar o setor. Há que ressaltar também a desvantagem de não haver regularmente no mercado produtos de qualidade (madeira classificada, tratada, seca e sem defeitos).

Há dois sistemas construtivos predominantes no mercado brasileiro de edificações em madeira. O mais difundido é o sistema em madeira maciça empilhada, que pode ser encontrado em praticamente todas as regiões do país e que utiliza madeiras nativas da região amazônica. Na região de Florianópolis, as empresas comercializam casas utilizando as espécies Grápia, Angelim-pedra, Itaúba, Roxinho, etc. A figura 1 ilustra o sistema construtivo.

Neste tipo de construção são empregadas peças de madeira maciça sob a forma de pranchas horizontais com junção do tipo macho-e-fêmea. Estas peças são presas em suas extremidades a montantes verticais, que são geralmente compostos de peças maciças com sulcos usinados para permitir o encaixe das pranchas horizontais. As peças de madeira combinam as funções estrutural, de fechamento e de revestimento, além de isolamento térmico, isolamento acústico e impermeabilização.

A prática mostrou, ao longo do tempo, que existem problemas intrínsecos a este sistema construtivo, em especial os efeitos causados pelas variações dimensionais das pranchas horizontais, que são normalmente empregadas com teor de umidade bem acima da umidade de equilíbrio do ambiente. Deste modo, a seção transversal das peças varia significativamente de dimensão, principalmente nas primeiras idades da edificação, causando o aparecimento de frestas, rangidos, acomodações indesejáveis, além de infiltrações de água e baixa permeabilidade ao ar, dentre outros inconvenientes.

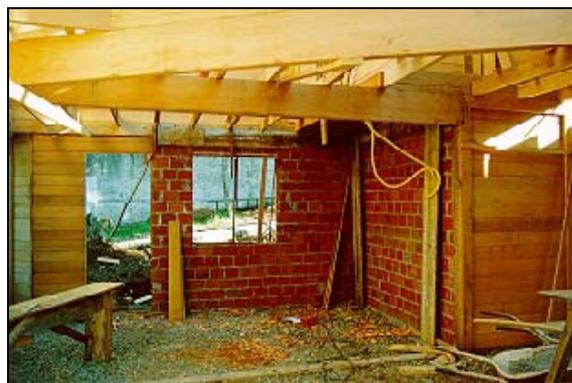


Figura 1 - Sistema construtivo em madeira maciça empilhada. Detalhe de área molhada em alvenaria, por desconhecimento das técnicas.

Na região Sul do Brasil, há predominância por outro sistema construtivo em madeira, que é o **sistema de tábuas verticais com mata-juntas**, mostrado na figura 2. As edificações são comercializadas normalmente na forma de “kits”, e a montagem muitas vezes é feita pelos próprios proprietários, ou por pessoal pouco qualificado. Caracteriza-se pela extrema precariedade, sendo destinado a famílias de baixa renda. Pode-se afirmar que estas edificações não apresentam desempenho global satisfatório, contribuindo para o aumento do preconceito do uso da madeira na construção de moradias em nosso país.

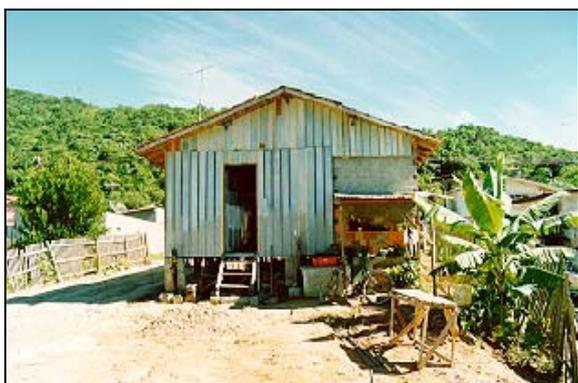


Figura 2 - Sistema construtivo em tábuas verticais com mata-juntas.

## 1.2 POR QUE CONSTRUIR EM MADEIRA?

A madeira apresenta características próprias e propriedades físicas e mecânicas que a qualificam como material capaz de prover edificações seguras, confortáveis, duráveis e com grande versatilidade de estilos e soluções para os espaços construídos. É também um material natural, oriundo de fonte renovável e, portanto, em sintonia com as exigências crescentes de preservação do meio ambiente.

A questão ambiental se tornou uma preocupação séria e irreversível para a sociedade moderna e tem produzido uma profunda mudança de paradigmas. Como afirma MERICO (1996), nosso desenvolvimento econômico encontrou uma barreira intransponível, que são os limites da biosfera. Segundo o autor, é preciso implementar uma análise econômica que consiga superar a análise exclusiva do fluxo monetário e que considere os fluxos de matéria e energia no ambiente desencadeados pelo processo de produção econômica. Este ciclo caminha no sentido de alterações nas legislações dos países, de modo a se controlar e restringir a fabricação de produtos degradantes ao meio ambiente e o uso indiscriminado dos recursos naturais em disponibilidade na superfície do nosso planeta.

Neste sentido, a madeira, desde que manejada de forma racional, constitui uma matéria-prima renovável e com baixo consumo de energia no seu ciclo de produção, utilização e descarte. Existe uma relação direta entre a floresta e a construção em madeira. Como enfatiza ZERBE (1992), as questões relacionadas às mudanças climáticas do planeta e as potenciais consequências adversas do aumento da temperatura enfatizam a importância de se economizar energia proveniente de combustíveis fósseis. Registros do observatório Mauna Loa, no Havaí, mostram que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera aumentou extraordinariamente desde 1950 (quando se iniciaram as medições). Isto se deve principalmente à queima de combustíveis fósseis aliado à diminuição das áreas de florestas nativas nas regiões tropicais. As florestas absorvem dióxido de carbono da atmosfera e funcionam como verdadeiros tanques de armazenamento.

Assim sendo, a utilização da madeira das florestas pode enclausurar carbono sob a forma de produtos de consumo por longos períodos de tempo. Ainda segundo ZERBE (1992), utilizando-se madeira em vez de aço, concreto, alumínio, plástico e outros materiais com alto gasto de

energia reduz-se o consumo de combustíveis fósseis e a conseqüente produção de CO<sub>2</sub> durante as fases de extração, processamento e uso destes materiais.

O Brasil possui forte vocação florestal e, através de políticas bem empreendidas, pode melhorar sua posição de destaque no panorama mundial de produção florestal. O artigo CONSUMO em Alta – Oferta em Baixa (1995) salienta que o cenário futuro será regido pelas florestas plantadas – caracterizadas por ciclos curtos e alta produtividade – e reciclagem de produtos de madeira e não-madeira. No Brasil, de acordo com dados do ano 2003 fornecidos no Estudo Setorial 2003 – Produtos de Madeira Sólida, divulgados pela ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, as florestas plantadas com Eucalyptus e Pinus atingem cerca de cinco milhões de hectares (ver gráfico da Figura 3). Estas são as duas espécies de reflorestamento que dominam o cenário das regiões Sul e Sudeste do país.

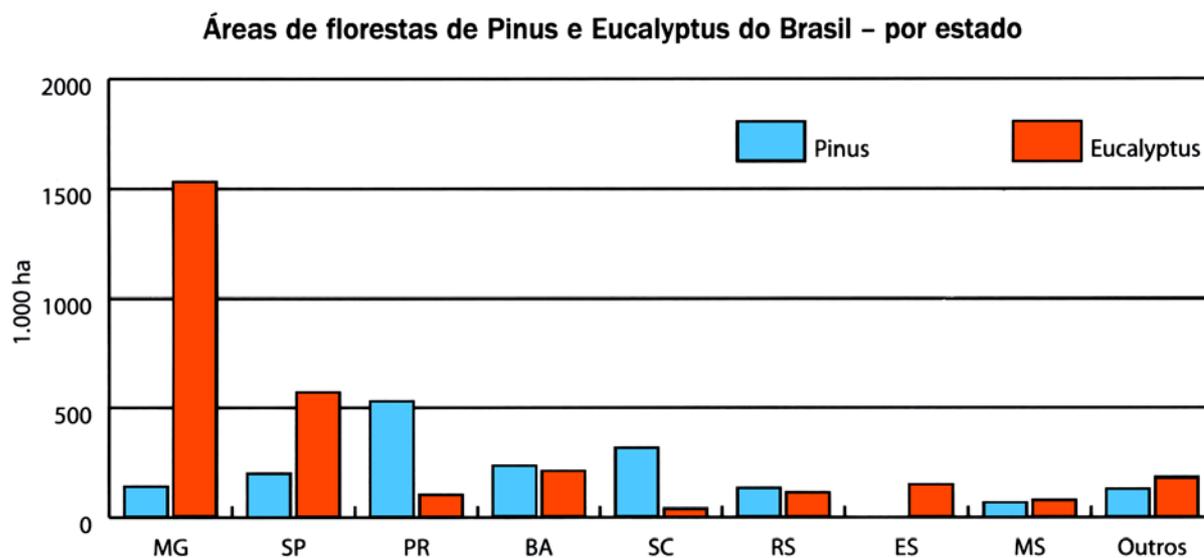


Figura 3 - Área plantada com Pinus e Eucalyptus no Brasil (Ha) – ano 2003 (fonte: ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente)

### 1.3 O SISTEMA PLATAFORMA (*Platform System*)

Em países mais desenvolvidos e com maior tradição em construções de madeira, são empregadas técnicas contemporâneas de construção que, como define BITTENCOURT (1995), englobam as estruturas hierarquizadas (ex. pilar-viga), as estruturas nervuradas (sistemas leves) e as construções em painéis estruturais (pré-industrializados).

De acordo com SÁNCHEZ (1995), as construções leves em madeira tiveram origem no século XIX, na América do Norte, como consequência de dois fatores: disponibilidade de produtos industriais inéditos e padronizados (madeira serrada e pregos), e a necessidade de um sistema rápido de construção para a colonização do oeste dos Estados Unidos.

Segundo ALLEN e THALLON (2002), a primeira versão de sistema leve em madeira, conhecido como Balloon Frame, era composta por inúmeras peças delgadas e pouco espaçadas, que iam de forma contínua desde a fundação até o telhado. Com o tempo, surgiram várias modificações no sistema, que buscavam seu aprimoramento, até chegar ao Plataforma System – ou Sistema Plataforma –, que é o sistema construtivo geralmente empregado nos dias de hoje, sendo responsável por mais de noventa por cento de todas as novas moradias e pequenas edificações nos Estados Unidos e Canadá, além de constituir o padrão para a maioria das construções pré-fabricadas em madeira. A Figura 4 ilustra a diferença fundamental entre o sistema Plataforma e o *Balloon Frame*. Segundo THALLON (2000), o sistema Plataforma sobrepujou seu antecessor devido à maior facilidade e rapidez de execução, e também por apresentar melhor desempenho frente ao fogo.

Como descreve GAUZIN-MÜLLER (1990), no sistema Plataforma, ao contrário do Balloon Frame, os montantes verticais tem comprimento restrito à altura de cada pavimento; a estrutura de piso se apóia sobre as paredes e se estende até o contorno da edificação, servindo de base – ou plataforma – para a montagem das paredes do pavimento superior. Isto significou um grande avanço, pois simplificou significativamente o processo de execução das estruturas.

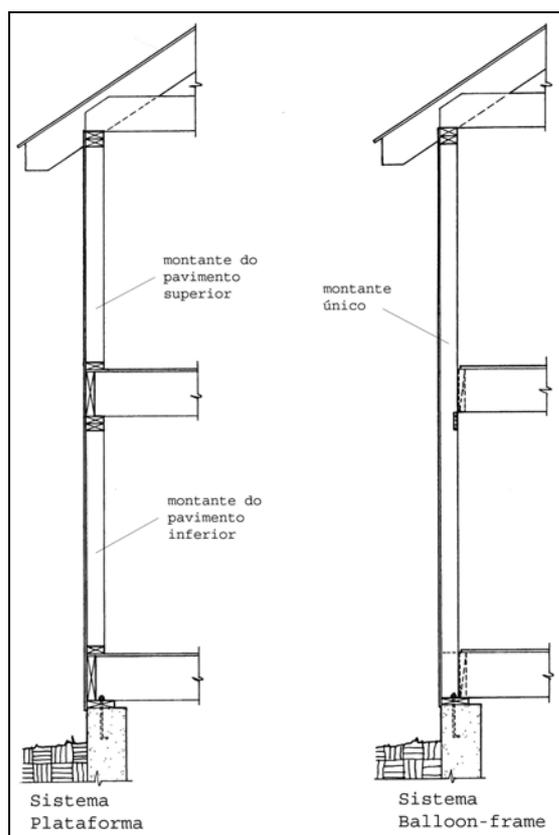


Figura 4 - Ilustração mostrando a diferença fundamental entre os sistemas *Platform* e *Balloon-frame* (adaptado de ALLEN e THALLON, 2002).

As edificações construídas no Sistema Plataforma conseguem satisfazer a um público bastante exigente de países desenvolvidos, propiciando edificações com qualidade, bom desempenho em uso e conforto. Segundo SEDIBOIS (1997), os fatores preponderantes que tornam a construção em ossatura de madeira competitiva em relação a outros modos de construção são a rapidez de execução e em condição seca, um bom isolamento térmico e uma adaptabilidade a todo tipo de arquitetura.

SÁNCHEZ (1995) cita que esta técnica alcançou um patamar superior de desenvolvimento tecnológico, se comparada com os sistemas tradicionais em madeira, como as construções em madeira maciça empilhada. Ainda de acordo com o autor, as principais características deste sistema que o diferenciam da prática tradicional em madeira são:

- Emprego de um grande número de elementos de pequena seção transversal;
- Facilidade de modulação e pré-fabricação de componentes, principalmente quando se dispõe de peças padronizadas e certificadas;

- As peças têm seção retangular simples, o que gera economia na sua fabricação;
- A união entre peças é bastante simples, sem juntas ou encaixes especiais, bastando o emprego de pregos ou parafusos, melhorando a produtividade;
- O tempo de construção é menor que o da construção tradicional devido à pré-fabricação de componentes e à construção seca;
- Facilidade de impermeabilização e isolamento térmico e acústico da edificação, pois as cavidades existentes na ossatura permitem a passagem de instalações elétricas e hidráulicas e o preenchimento com materiais isolantes;
- A maioria dos trabalhos se executa a seco, tornando a construção independente das estações climáticas e permitindo um processo mais limpo e rápido;
- Apresenta um alto grau de flexibilidade, tanto em relação ao projeto inicial, como também em modificações futuras, se necessárias;
- Exige uma grande quantidade de detalhes construtivos, devido ao elevado número de peças empregadas.

EINSFELD e PACHECO (2000) acrescentam os seguintes pontos:

- Economia de espaço no canteiro de obras;
- Redução do peso da estrutura e conseqüente economia na etapa das fundações;
- Facilidade de manutenção;
- Ganho de área útil interna na unidade residencial, devido à menor espessura das paredes.

ALLEN e THALLON (2002) enfatizam a facilidade e rapidez com que as edificações em sistema leve em madeira são construídas, requerendo investimento mínimo em equipamentos e ferramentas. Entretanto, ressaltam também suas deficiências, tais como a combustibilidade da madeira, suas mudanças dimensionais oriundas de variação do teor de umidade e sua baixa

durabilidade se exposta à umidade. Porém, ainda segundo os autores, estes problemas podem ser contornados por meio de um projeto inteligente e de uma execução cuidadosa. Já GAUZIN-MÜLLER (1990) enfatiza que o projeto deve ser bastante compacto, evitando-se grandes aberturas, para não comprometer a estabilidade horizontal da edificação. O autor considera o sistema Plataforma mais flexível que o pilar-viga e geralmente mais econômico.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA**

O Brasil apresenta um déficit habitacional expressivo, com inúmeras famílias privadas do abrigo e muitas outras vivendo em moradias que não oferecem condições adequadas de habitabilidade. Este é um problema grave para o país e que precisa ser solucionado, uma vez que a habitação, como salienta TURNER (1976), é uma das necessidades fundamentais do ser humano, pois é ali que ele abriga sua família, realiza suas atividades básicas e estabelece seu referencial social.

A necessidade de construção de moradias abre espaço para o surgimento de tecnologias construtivas inovadoras como alternativa às tradicionalmente utilizadas na prática da construção civil brasileira. A adoção de novos materiais e processos construtivos pode exercer um papel importante para a reversão do quadro atual de inércia do setor habitacional. Há uma tendência por processos que visem um maior grau de industrialização da construção, seja através da pré-fabricação de elementos e componentes, seja através da racionalização por meio de novos processos construtivos, tudo isso com o objetivo de aumentar a produtividade, diminuir custos e manter melhor controle de qualidade dos produtos, tornando a execução mais ágil e econômica.

O grande potencial madeireiro do país contrasta com a baixa participação das edificações em madeira no mercado da construção. De fato, isto se deve ao baixo desenvolvimento tecnológico dos produtos ofertados em madeira, o que acaba gerando preconceito com relação ao uso desta matéria-prima para a construção de moradias. Existe a necessidade de modernização do setor, a partir da adoção de tecnologias mais avançadas de se construir em madeira.

Dentro deste contexto, o Sistema Plataforma apresenta características próprias que o tornam uma alternativa promissora e condizente com as condicionantes brasileiras, na medida em que

possibilita a construção de moradias com rapidez e qualidade, empregando materiais simples e facilmente encontrados no mercado nacional. Além disso, a tipologia do sistema construtivo favorece a pré-fabricação de elementos e componentes, possibilitando um alto grau de industrialização da construção. Entretanto, a não existência de critérios normativos pela NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (1997), bem como da escassez de referências nacionais sobre o assunto dificultam a assimilação e divulgação deste sistema construtivo.

Cabe ainda ressaltar a adequabilidade do Sistema Plataforma diante da tendência de, num futuro pouco distante, haver maior restrição ao uso de madeira tropical e o consumo convergir para o emprego de madeira proveniente de florestas plantadas na construção civil. Estas florestas se caracterizam por ciclos curtos, alta produtividade e maior homogeneidade da matéria-prima produzida, porém fornecendo madeira a baixas idades e conseqüentemente com limitação em termos de tamanho das peças. Este ponto favorece o emprego do Sistema Plataforma, cuja trama estrutural é formada pela união de inúmeras peças de seção reduzida.

A existência de um importante parque produtor de chapas de madeira reconstituída também viabiliza o emprego do Sistema Plataforma, pois estas chapas são empregadas em grande quantidade, tendo um papel fundamental para o fechamento dos elementos de piso e parede, exercendo função estrutural e participando efetivamente da resistência da edificação à ação das forças verticais e laterais. Segundo SPELTER e MCKEEVER (1996), o fechamento de piso e parede de construções leves em madeira constitui a aplicação principal das chapas de madeira produzidas na América do Norte, sendo este mercado dominado pelo compensado e pelo OSB – Oriented Strand Board, que é formado por tiras de madeira orientadas, que são prensadas e coladas com resina fenólica. Atualmente, o OSB vem tomando o mercado anteriormente praticamente exclusivo do compensado. Um estudo realizado pelo Wood Products Promotion Council e pelo Forest Product Laboratory, em 1996, revelou que no meio-oeste e nordeste dos Estados Unidos, o OSB já respondia por quase cem por cento da participação neste mercado. Isto se deve, segundo SPELTER (1997), ao fato de ambos os materiais apresentarem desempenho equivalente, porém com custo menor para o OSB. No Brasil, as chapas de OSB começaram recentemente a ser fabricadas pela empresa MASISA DO BRASIL, no interior do Paraná, o que representa um grande impulso para alavancar a participação das construções leves em madeira em nosso país.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO

Apesar do grande potencial brasileiro para a produção de madeira proveniente de florestas plantadas e também de chapas de madeira reconstituída, o mercado de edificações em madeira no Brasil é ainda modesto e marcado pelo preconceito, em virtude da utilização de sistemas construtivos que não conseguem oferecer um padrão de qualidade satisfatório.

O emprego de sistemas leves em madeira é ainda pouco difundido no Brasil, sendo estes praticamente desconhecidos da população em geral. Existem algumas raras e isoladas iniciativas de empresas trabalhando na construção de edificações no Sistema Plataforma na região Sul, porém estas empresas não encontram subsídios em termos de publicações, normas ou pesquisas experimentais para basearem a concepção arquitetônica das edificações, não somente em termos dos detalhes construtivos, mas também para a segurança em relação ao comportamento estrutural.

No exterior, o Sistema Plataforma e seus elementos e componentes estruturais vêm sendo estudados e empregados há várias décadas, e existe uma extensa bibliografia a este respeito. Em nosso país, este sistema construtivo pode ser considerado ainda inovador, e suas condicionantes não estão bem definidas, o que atrapalha e desestimula seu emprego e disseminação.

Os princípios estáticos que descrevem o comportamento dos elementos construtivos no Sistema Plataforma diferem significativamente, em alguns pontos, do tradicional sistema pilar-viga, bastante conhecido em nosso país e mais facilmente assimilado pelos engenheiros e arquitetos brasileiros, cuja graduação enfatiza este tipo de construção. Deste modo, é natural que a compreensão dos mecanismos de ação do Sistema Plataforma seja menos intuitiva. Isto ocorre, em especial, quando analisamos a ação de forças laterais, como aquelas devido ao vento. Neste caso, as estruturas de piso e parede, formadas pela solidarização da ossatura em madeira com as chapas de fechamento, devem resistir às forças cisalhantes atuantes no seu próprio plano. É preciso que o profissional responsável pela concepção da edificação compreenda os princípios estáticos que regem o comportamento das estruturas de piso e parede, para que possa concebê-las e dimensioná-las corretamente.

Há necessidade de suprir o meio técnico com estudos e pesquisas experimentais que traduzam o funcionamento global do sistema e forneçam subsídios para a concepção dos projetos, de modo a

permitir que se possa prever o desempenho dos diversos elementos e componentes que formam a trama estrutural. O contexto brasileiro apresenta características próprias em relação a outros países, e toda e qualquer tecnologia estrangeira a ser explorada deverá levar em conta as diferenças em termos de matérias-primas, clima e mão-de-obra, dentre outros fatores.

Em experiências passadas, como cita MITIDIARI FILHO (1998), diversos sistemas construtivos inovadores foram empregados sem que a tecnologia estivesse devidamente desenvolvida e avaliada, e muitas construções acabaram apresentando patologias crônicas e precoces, comprometendo a durabilidade destas obras. Portanto, é preciso que se tenha o domínio sobre o desempenho dos elementos construtivos que compõem o Sistema Plataforma, para que se possa ter segurança e confiabilidade no seu emprego em edificações. Embora haja estudos internacionais sobre o assunto, é preciso pesquisar o comportamento destes elementos fabricados a partir de matérias-primas nacionais, para que se possa ter a garantia de utilização do Sistema Plataforma de modo seguro e confiável.

Neste sentido, este trabalho busca estudar um ponto específico e importante que necessita de maior embasamento teórico e experimental no contexto brasileiro, que compreende o comportamento das paredes estruturais frente à ação de forças laterais de vento. De acordo com SALENIKOVICH (2000), há diversos fatores que exercem influência direta sobre o comportamento destes elementos de parede, tais como a relação altura/comprimento, a densidade de pregos, as condições de fixação e ancoragem, a presença de aberturas de portas e janelas, dentre outras. Esta pesquisa se propõe a aprimorar o conhecimento teórico e experimental do tema em questão.

### **1.5.1 Objetivo Geral**

Este trabalho pretende focar as paredes estruturais concebidas no Sistema Plataforma e confeccionadas a partir de matérias-primas nacionais, como a madeira de *Pinus spp* proveniente de florestas plantadas da região Sul e as chapas de madeira reconstituída, realizando uma série de ensaios experimentais em laboratório, em protótipos de parede em tamanho real, com o intuito de avaliar seu comportamento sob força lateral, em função da variação de determinados parâmetros relevantes.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos resumizam a proposta deste estudo:

- Descrever o Sistema Plataforma, mostrando diferentes soluções construtivas para os elementos e componentes de piso e parede, e apresentar premissas de dimensionamento destes elementos sob a ação de forças verticais e horizontais;
- Avaliar o comportamento de protótipos de paredes estruturais em tamanho real, sob a ação de forças no seu plano, estudando a influência de determinadas variáveis que afetam o desempenho global destes elementos construtivos;
- Verificar a existência de modelos analíticos e/ou empíricos para o cálculo de paredes estruturais submetidas a carregamento lateral no próprio plano, buscando sua validação para os protótipos ensaiados;
- Comparar a rigidez da parede estrutural, obtida nos ensaios experimentais, com a rigidez obtida em modelo numérico, a partir de modelagem através de programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos.

## **2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA PLATAFORMA**

Este capítulo faz uma apresentação do Sistema Plataforma, descrevendo os principais elementos que formam a sua trama estrutural. Aborda também a distribuição das forças através da edificação, mostrando os mecanismos de ação destas forças percorrendo os elementos de parede, piso e cobertura. A percepção desta interação entre elementos estruturais é fundamental para a compreensão de suas premissas de cálculo.

### **2.1 TIPOLOGIA CONSTRUTIVA**

No Sistema Plataforma, a combinação da ossatura em madeira, formada por peças simples e delgadas, trabalhando solidariamente com elementos de fechamento (geralmente chapas de madeira reconstituída), aporta aos sistemas de piso, parede e cobertura a resistência e rigidez necessárias ante às ações verticais e horizontais (SÁNCHEZ, 1995). Estes elementos aliam as funções de aporte estrutural e de fechamento da edificação, diferindo do tradicional sistema pilar-viga, que se caracteriza pelos grandes elementos estruturais.

A montagem da estrutura em madeira começa pelo erguimento e fixação dos painéis de parede às fundações, observando-se o alinhamento, prumo e nivelamento. Nesta etapa, há necessidade de escoramento provisório dos painéis, até que a estrutura de piso esteja concluída e os painéis de parede recebam as chapas de fechamento, o que irá proporcionar o travamento definitivo do conjunto. A estrutura de piso é construída sobre as paredes, formando uma plataforma sobre cuja superfície são erguidos os painéis de parede do pavimento seguinte. Finalizando a montagem da trama estrutural da edificação, é construída a estrutura de cobertura sobre os painéis de parede do último pavimento, sendo composta, comumente, por uma série de treliças leves pouco espaçadas.

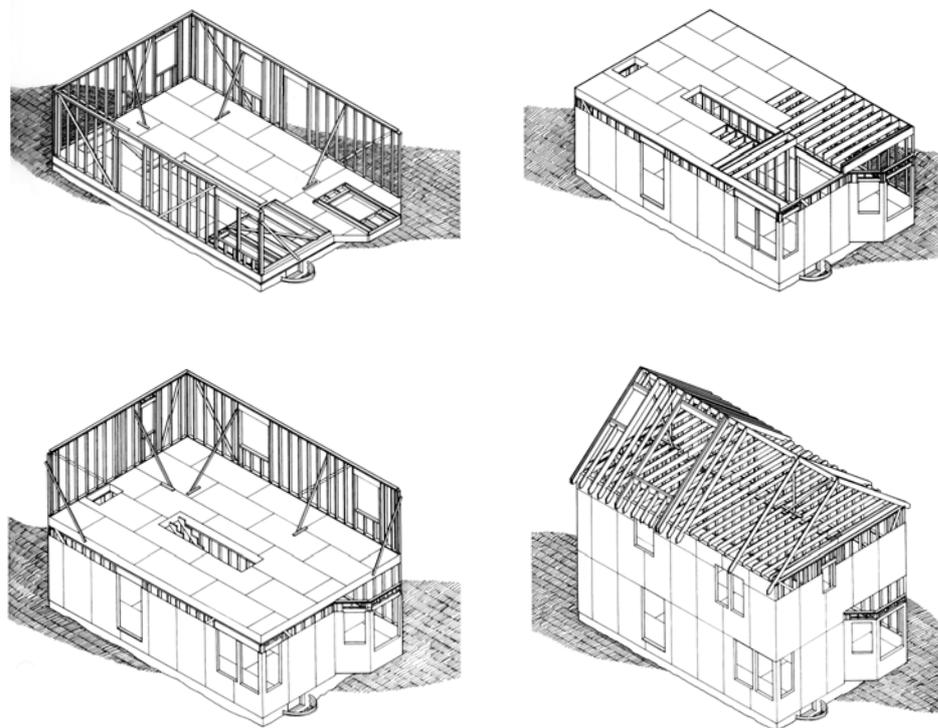


Figura 5 - Ilustrações mostrando a construção de uma edificação em Sistema Plataforma (adaptado de ALLEN e THALLON, 2002)

Como destaca BITTENCOURT (1995), apesar da aparente simplicidade construtiva, por empregar peças simples e com ligações comuns por pregos, os sistemas leves em madeira exigem muito esmero na execução, pois cada erro cometido é ressaltado na integração do conjunto. A exatidão e o rigor na execução são alguns dos princípios a serem considerados numa obra em madeira, que acaba sendo menos tolerante que outros sistemas construtivos.

A pré-fabricação total ou parcial de elementos e componentes agiliza a execução da obra, havendo diferentes níveis de industrialização. Na Europa, por exemplo, existem empresas com níveis elevados de industrialização, transportando para a obra um pavimento inteiro pré-fabricado, inclusive contendo instalações sanitárias completas, sendo o pavimento içado através de uma grua e posicionado no local definitivo. Embora isto seja possível, na maioria das construções a pré-fabricação não atinge tais proporções, sendo mais comum a pré-montagem de apenas alguns componentes, como por exemplo as treliças de telhado ou os painéis de parede, que podem chegar ao canteiro de obras com a ossatura pronta e uma das faces cobertas por chapa de fechamento (a outra face é deixada livre para permitir a fixação dos painéis à base e para passagem de tubulações hidráulicas e elétricas).

### 2.1.1 Concepção das Fundações

Por se tratar de sistema leve em madeira, e considerando que a maioria das edificações neste sistema construtivo são compostas de um ou dois pavimentos, as fundações estarão sujeitas a forças relativamente reduzidas. Isto se traduz em soluções mais simples e econômicas. Entretanto, as fundações devem apresentar uma superfície bem nivelada, no esquadro e com medidas precisas, do contrário o andamento da obra em madeira será severamente afetado, com eventual necessidade de trabalhos corretivos, calços, peças com medidas fora do padrão, e assim por diante.

Na América do Norte, onde o Sistema Plataforma é bastante empregado, devido a fatores culturais e climáticos as casas normalmente possuem porão no subsolo, recorrendo-se à escavação do terreno e à construção de muros laterais de contenção (alvenaria, concreto armado, madeira), sobre os quais se ergue a edificação. No Brasil, a utilização do subsolo não é comum nas moradias, sendo neste caso geralmente especificadas fundações superficiais.

Em função das condições específicas de cada terreno, pode-se ter usualmente uma das seguintes soluções:

- laje do tipo *radier*, que forma uma superfície plana sobre a qual são assentados e fixados os elementos de parede;
- fundações com sapatas de pescoço alongado e cintas de amarração, permitindo elevar do nível do solo a estrutura de piso do pavimento térreo, sendo uma boa opção no caso de terrenos em declive, por exemplo;
- fundações em sapata corrida, com vigas baldrame sob o alinhamento das paredes;
- estacas de concreto ou postes de madeira tratada.

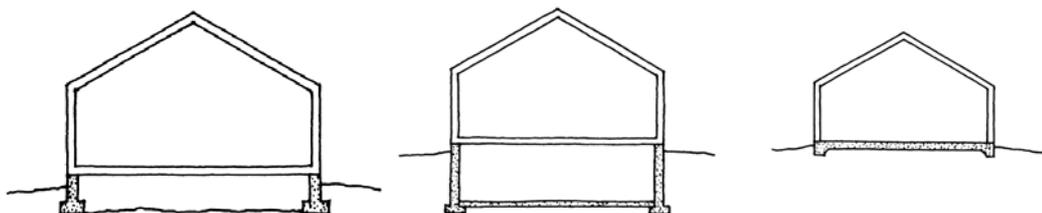


Figura 6 - Diferentes soluções para as fundações (adaptado de THALLON, 2000)

## 2.1.2 Composição dos Elementos de Parede

### 2.1.2.1 Ossatura em Madeira

Os principais elementos da ossatura são os montantes verticais e as travessas inferior e superior, que são unidos por pregos, podendo a ossatura ser pré-fabricada ou confeccionada no próprio canteiro de obras. Segundo SÁNCHEZ (1995), para compor as peças da ossatura se empregam seções padronizadas, sendo a mais comum na América do Norte a seção nominal 2" x 4", cujas medidas reais são de 38 mm x 89 mm. Em determinados casos, dependendo da magnitude das forças atuantes, podem ser requeridas peças de maior seção, como por exemplo a seção nominal 2" x 6", cujas medidas reais são de 38 mm x 140 mm. O espaçamento mais comum entre montantes é de 400 mm, porém esta distância pode aumentar para 600 mm ou diminuir para 300 mm, em função das forças a suportar e da seção transversal disponível das peças de madeira para compor a ossatura. O *Wood Frame Construction Manual* (WFCM, 1995) estipula que o espaçamento entre montantes não deve ultrapassar 24 in. (610 mm). É desejável utilizar-se a mesma modulação para pisos e paredes, para evitar que haja excentricidade na transferência das cargas gravitacionais das vigotas de piso para os montantes da ossatura da parede situada logo abaixo.

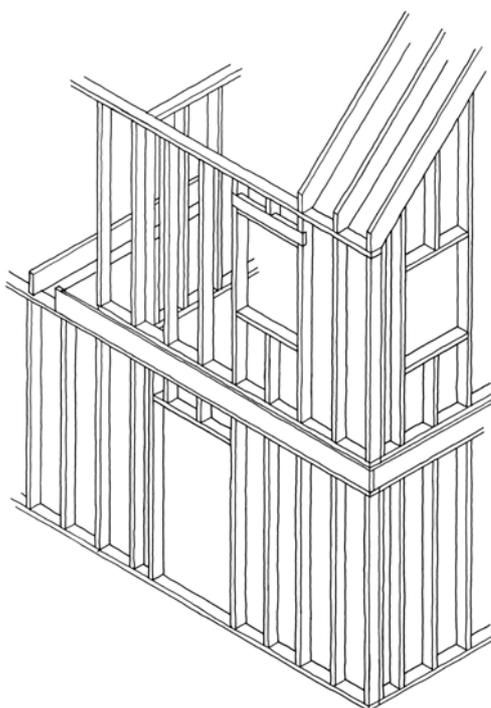


Figura 7 - Ossatura de parede montada sobre estrutura de piso (SÁNCHEZ, 1995)

Os montantes devem ser colocados com o eixo de maior inércia de sua seção transversal paralelo ao plano da parede, para que tenham maior capacidade resistente frente à ação de forças horizontais (ex. vento) perpendiculares ao plano da parede (BREYER et al, 2003).

A união entre os montantes verticais e as travessas inferior e superior é feita normalmente por meio de pregos cravados de topo ou em ângulo. Os códigos norte-americanos fornecem as seguintes especificações, referentes a paredes com espaçamento normal entre montantes de tamanho padrão (medida nominal 2"x 4"):

Tabela 1 - Especificação de pregos para montagem da ossatura de paredes

| Modo de Pregação | Uniform Building Code (UBC, 1997) | International Residential Code (IRC, 2003) | Wood Frame Construction Manual (WFCM, 1995) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| de topo          | 2 pregos 16d                      | 2 pregos 16d                               | 2 pregos 16d                                |
| em ângulo        | 4 pregos 8d                       | 3 pregos 8d                                | ----                                        |

\* prego 8d ( $\delta \approx 3,3$  mm;  $L \approx 63$  mm)

\*\* prego 16d ( $\delta \approx 4,1$  mm;  $L \approx 89$  mm)

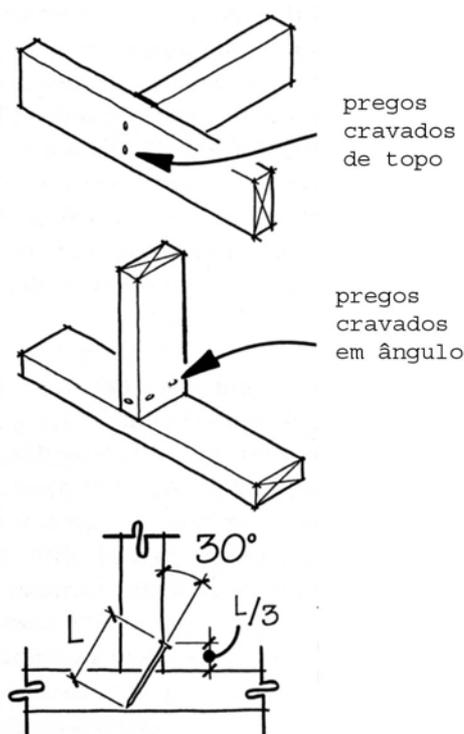


Figura 8 - Pregos cravados de topo e em ângulo (adaptado de WOESTE, 2001)

A publicação da APA – DIAPHRAGMS and Shear Walls – Design and Construction Guide (2001) exemplifica formas alternativas para a união entre montantes e travessas da ossatura em madeira, utilizando-se conectores metálicos especiais em vez de pregos (ver Figura 9).

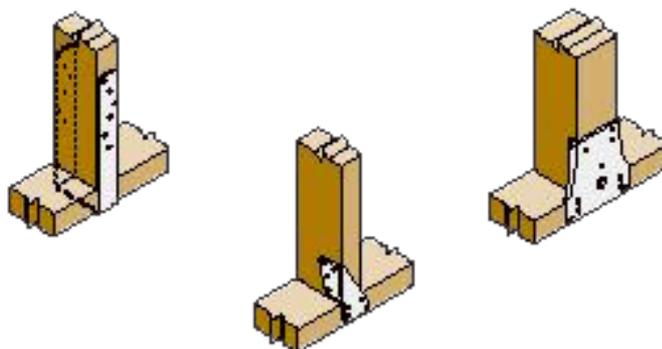


Figura 9 - Formas alternativas de fixação de um montante vertical à travessa inferior (APA, 2001).

Segundo THALLON (2002), nas extremidades da parede, onde as tensões são maiores, os montantes devem ser mais fortes que os montantes padrão. A maioria dos códigos de construção norte-americanos requer no mínimo a utilização de montantes duplos. A Figura 10 ilustra diferentes soluções construtivas para cantos de parede e, de forma similar, as interseções entre paredes.

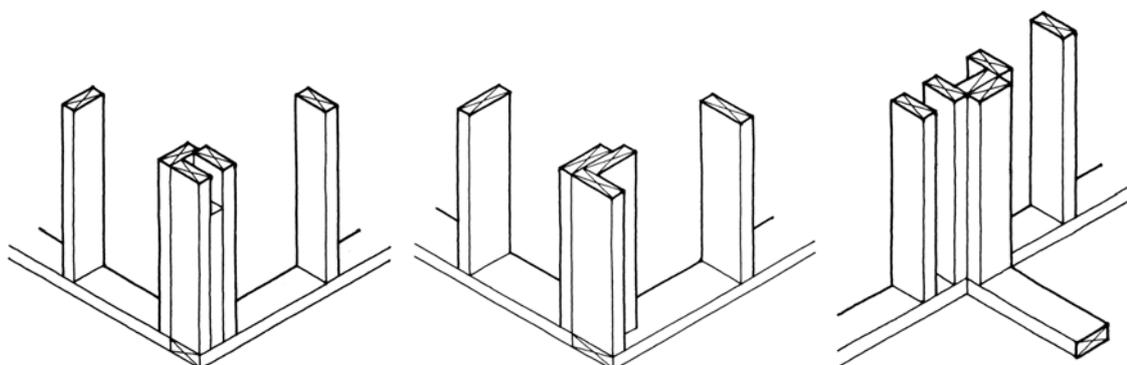
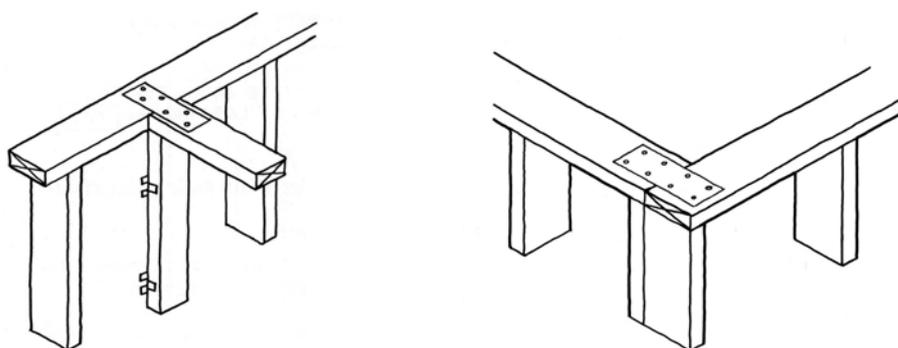


Figura 10 - Diferentes soluções para interseção de paredes (adaptado e THALLON, 2000).

A parte superior dos painéis de parede deve consistir de dupla travessa, com o cuidado de transpassar as peças nas junções de canto de parede e também nas emendas longitudinais, devendo ser respeitado um espaçamento entre as emendas de pelo menos 24 in. (610 mm), segundo o *International Residential Code* (IRC, 2003). A utilização de travessa superior simples é permitida, desde que as emendas longitudinais, as junções de canto de parede e as interseções de paredes sejam feitas com cobrejuntas metálico, conforme ilustrado na Figura 11.



**Figura 11** – Travessa superior simples com cobrejuntas nas emendas. (modificado de THALLON, 2000).

Tabela 2 - Especificação de pregos para união das duas peças da travessa superior

| <i>Uniform Building Code (UBC, 1997)</i> | <i>International Residential Code (IRC, 2003)</i> | <i>Wood Frame Construction Manual (WFCM, 1995)</i> |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Pregos 10d a cada 24in. (610mm)          | Pregos 16d a cada 16in. (406mm)                   | 2 pregos 16d per foot (300mm)                      |

#### 2.1.2.2 Formas de Fixação dos Painéis de Parede à Fundação

Os painéis de parede devem ser fixados à estrutura de fundação sobre a qual são assentados. A ligação de um painel de parede à estrutura de fundação convencional em concreto é feita por meio de parafusos de fixação devidamente posicionados no concreto ainda fresco (Figura 12). Uma forma alternativa seria a utilização de parafusos auto-atarrachantes (*parabolts*) aplicados no momento da fixação dos painéis.

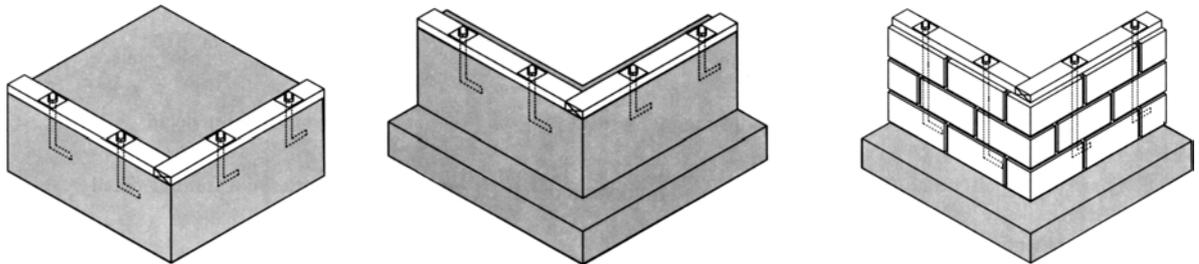


Figura 12- Parafusos de fixação em diferentes tipos de fundação (extraído do WFCM, 1995).

Os códigos norte-americanos *Uniform Building Code* (UBC, 1997) e *International Residential Code* (IRC, 2003) concordam nas seguintes recomendações:

- usar parafusos com diâmetro mínimo de  $\frac{1}{2}$  in. (12,7 mm);
- mínimo de dois parafusos por peça fixada à fundação;
- espaçamento máximo de 6 ft. (1829 mm) entre parafusos;
- deve haver um parafuso próximo às extremidades de cada peça fixada à fundação, cuja distância à borda da peça deve ser não maior que 12 in. (305 mm) ou sete vezes o diâmetro do parafuso.

Na prática construtiva convencional, podem ser observadas formas diferenciadas de se fazer a fixação dos painéis de parede à fundação. Esta forma de fixação pode exercer influência sobre o comportamento da edificação frente às solicitações laterais. GUERTIN e ARNOLD (2001) definem as duas práticas construtivas tradicionais empregadas na América do Norte:

a) Travessa inferior simples: é a forma mais direta e utiliza menos material. Consiste na fixação da travessa inferior da parede à fundação, através dos parafusos de fixação. Primeiramente devem ser marcados os pontos de furação na travessa inferior. Depois de realizada a furação, direciona-se a travessa seguindo seu alinhamento marcado (riscado) no chão.

Para a montagem das paredes, há duas possibilidades distintas. Uma delas consiste em fixar primeiramente a travessa inferior simples e, em seguida, posicionar o restante da ossatura,

fixando-a por meio de pregos cravados em ângulo. O manuseio da ossatura incompleta, com os montantes soltos, é mais trabalhoso.

A outra possibilidade é fixar a ossatura inteira, previamente montada, à base. Neste caso, pode haver dificuldade na obtenção do alinhamento e nivelamento das paredes, por se trabalhar com a ossatura inteira, e não somente com a travessa inferior.

b) Travessa inferior dupla: consiste na fixação prévia de uma guia de madeira à fundação, por meio dos parafusos de fixação, sobre a qual é fixado o painel de parede. Esta fixação do painel à guia pode ser feita de duas formas: por meio de pregos ou, quando o comprimento permitir, através dos próprios parafusos de fixação, bastando que se deixe as porcas dos parafusos embutidas na guia. A grande vantagem em se utilizar a guia está na maior facilidade de instalá-la, garantindo maior precisão no alinhamento e nivelamento das paredes, embora consumindo um pouco mais de madeira. Além disso, o emprego da dupla travessa inferior permite que os cantos de parede possuam uniões transpassadas das duas peças da travessa inferior, melhorando a estabilidade.

A guia de madeira é formada por peças delgadas, geralmente com a mesma seção transversal da travessa inferior da parede, que são tratadas contra umidade e insetos, para poder trabalhar diretamente em contato com as fundações, protegendo a madeira da ossatura da parede (JONES, 1995).

Segundo WAGNER e SMITH (2003), a maioria dos carpinteiros norte-americanos prefere fazer um furo com diâmetro  $\frac{1}{4}$ " (6,3 mm) maior nas peças da travessa inferior para permitir algum ajuste na sua colocação.

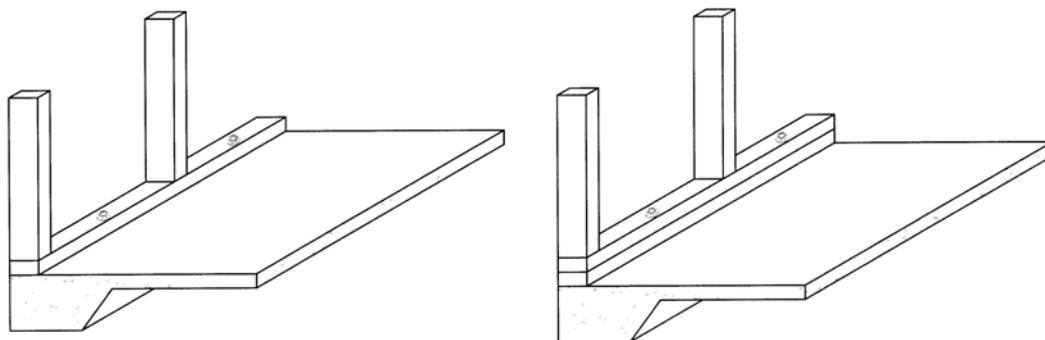


Figura 13 – Travessa inferior simples e travessa inferior dupla.

### 2.1.2.3 Aberturas de Portas e Janelas

Nas paredes que contêm portas e/ou janelas, há necessidade de se alterar a disposição regular das peças da ossatura para permitir a inserção das aberturas. Para isto devem ser confeccionados determinados elementos especiais, tais como vergas, umbrais e contravergas, mostrados na Figura 14.

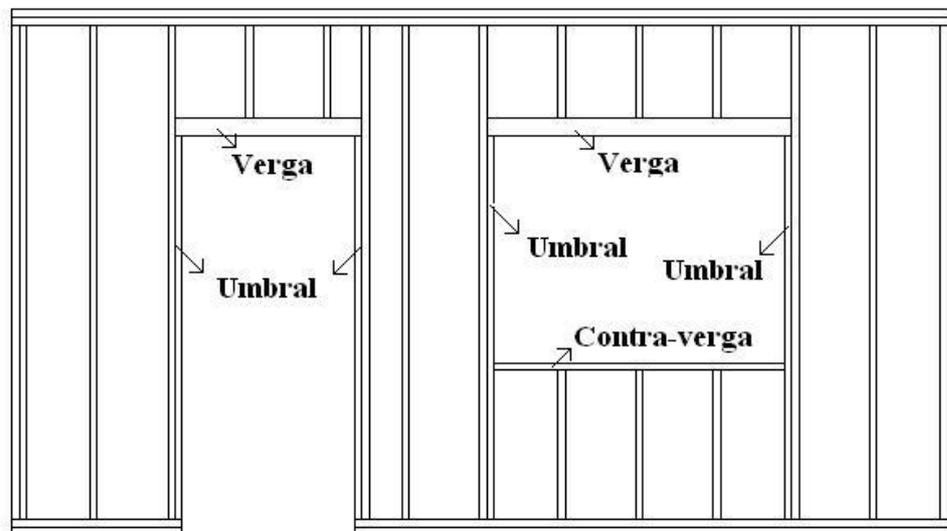


Figura 14 - Ossatura de parede com aberturas de porta e janela

As vergas devem ser apoiadas em suas extremidades aos umbrais, que são peças idênticas aos montantes, porém de comprimento limitado ao nível da verga. Cada umbral deve fazer par com um montante inteiro, ao qual possa ser fixado. Assim sendo, dependendo da posição das aberturas na parede, pode ser necessário acrescentar montantes extras ao lado dos umbrais das portas e janelas. A contraverga das janelas é formada por uma peça única horizontal, geralmente de mesma seção transversal dos montantes (principalmente a largura deve ser a mesma da parede), que é fixada a montantes curtos.

As vergas de portas e janelas podem ser concebidas de diferentes formas. THALLON (2000) apresenta diferentes soluções construtivas para as vergas de portas e janelas de paredes com carregamento superior atuante, conforme mostrado na Figura 15.

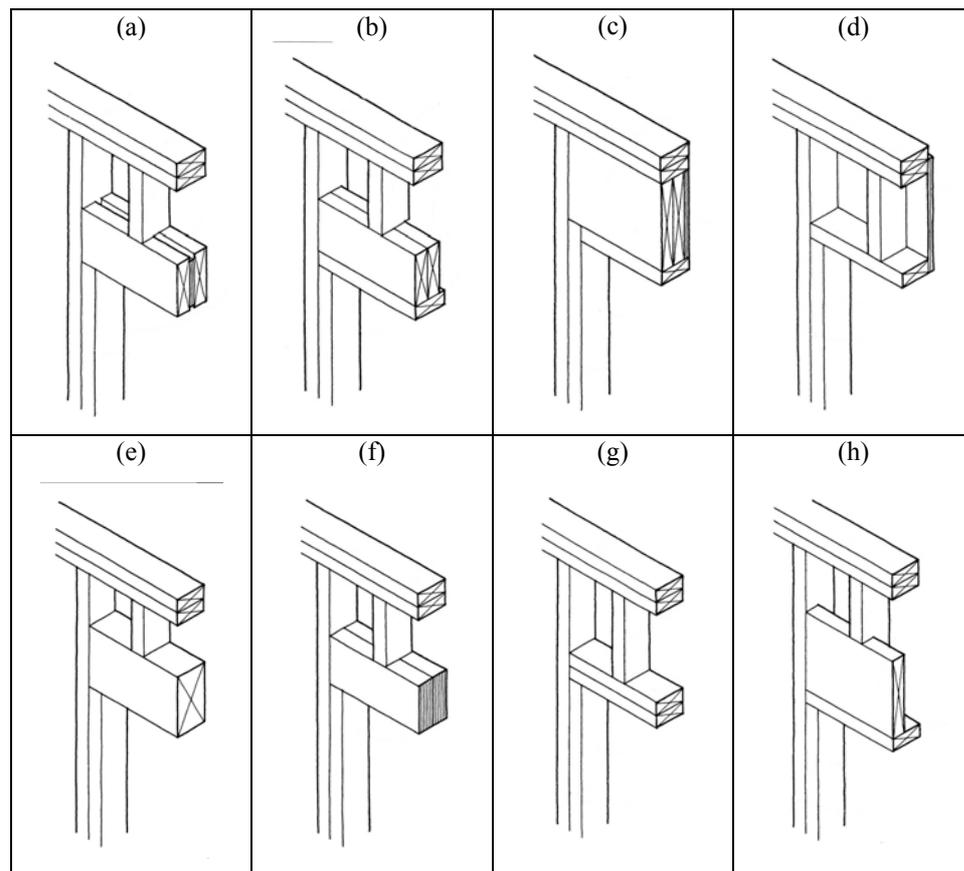


Figura 15 - Diferentes soluções construtivas para compor vergas de portas e janelas (THALLON, 2000).

De acordo com RANDALL (2001), na confecção das vergas é comum o uso de pedaços de chapas de madeira reconstituída (ex. compensado) como material de enchimento, com o intuito de igualar a espessura da verga à espessura da parede. Por exemplo, numa parede com montantes e travessas de seção nominal 2" x 4" (dimensões reais de 38 mm x 89 mm), a espessura da ossatura corresponderia a 89 mm. Caso a verga fosse concebida conforme a solução mostrada na Figura 15 (a), isto é, feita com duas peças de mesma seção que a da ossatura, uma chapa de compensado de 12 mm seria suficiente para tornar a espessura da verga igual a 88 mm (38 mm + 38 mm + 12 mm). Para unir as peças que formam a verga, devem ser usados pelo menos 2 pregos 16d a cada 16 in. (406 mm). Nas extremidades da verga, fazer sua união aos montantes por meio de pregação de topo (pelo menos um prego 20d em cada peça).

Em paredes internas divisórias ou em paredes sem função de suportar carga (ex. paredes paralelas à direção das vigotas de piso e sem demais cargas provenientes de pavimentos superiores), a configuração das aberturas de portas e janelas pode ser simplificada, conforme a figura abaixo (GUERTIN e ARNOLD, 2001).

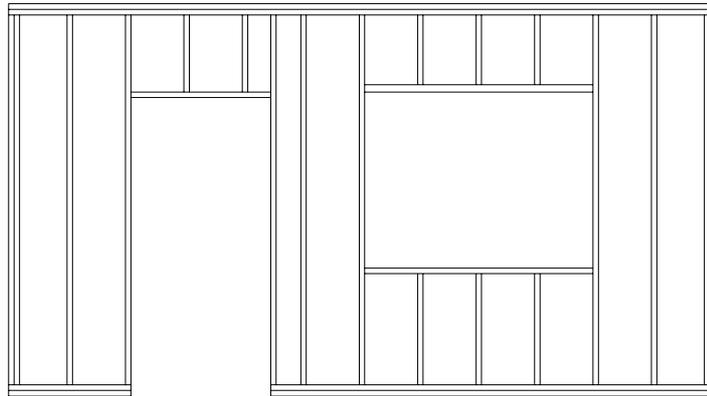


Figura 16 - Ossatura simplificada (sem vergas e umbrais) para paredes sem função estrutural, segundo GUERTIN e ARNOLD (2001).

#### 2.1.2.4 Chapas para Fechamento das Paredes

Para o fechamento das paredes devem ser fixadas chapas às duas faces da ossatura em madeira. Todas as arestas da chapa devem receber pregação, para evitar a sua flambagem. As chapas de fechamento podem ser de diferentes tipos, tais como:

- chapas de madeira reconstituída (ex. compensado e OSB);
- gesso acartonado;
- argamassa de emboço (*stucco*);
- painéis compósitos (incluindo painéis compostos de madeira e cimento);
- tábuas de madeira na diagonal, ou ainda tábuas na horizontal em paredes com contraventamento externo.

Segundo BREYER et al (2003), apesar de haver diversas opções para o fechamento das paredes, as chapas de madeira reconstituída propiciam capacidade resistente significativamente superior à dos demais materiais, sendo consideradas nos dias de hoje o material padrão de uso. As chapas de madeira reconstituída são bastante estáveis dimensionalmente, porém algumas mudanças são

esperadas devido às variações das condições de umidade ambiente. Isto ocorre principalmente nos estágios iniciais de vida da edificação, quando o material está se equilibrando às condições higroscópicas do local. Por esta razão, os códigos de construção norte-americanos recomendam deixar uma folga entre chapas adjacentes da ordem de 1/8 in. ( $\approx 3$  mm).

As chapas de fechamento podem ser fixadas na ossatura tanto na posição vertical como na horizontal (ver Figura 17). Segundo THALLON (2000), a aplicação na vertical é mais comum e permite que todas as arestas da chapa de fechamento encontrem apoio nos montantes e travessas da ossatura (mas somente quando o comprimento da chapa corresponde à altura do pé-direito), permitindo a pregação ao longo de todo o contorno da chapa. Isto não ocorre quando as chapas são dispostas horizontalmente, devendo ser acrescentados à ossatura elementos bloqueadores, ligando montantes adjacentes e servindo de base para a fixação dos pregos. Os elementos bloqueadores, inseridos na ossatura da parede, auxiliam no comportamento da edificação em situação de incêndio. De acordo com THALLON (2000), a instalação das chapas na horizontal é recomendada quando houver solicitações mais acentuadas na direção perpendicular à superfície das chapas. Neste caso, a orientação das fibras da madeira é mais favorável para vencer o vão entre montantes, melhorando a rigidez. Isto acontece, por exemplo, quando a parede recebe revestimento de argamassa (*stucco*) sobre as chapas de fechamento.

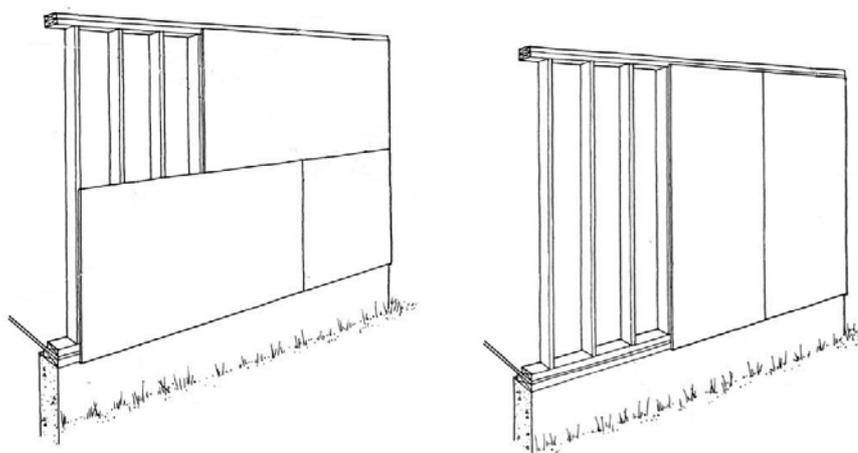


Figura 17 – Disposição horizontal e vertical das chapas de fechamento (extraído de THALLON, 2000).

Para o acabamento final das paredes, podem ser empregados diversos tipos de revestimentos, tais como lambris de madeira, azulejos cerâmicos, gesso acartonado, dentre outros. A superfície limpa e plana, formada pelas chapas de fechamento fixadas à ossatura, serve de base para a aplicação de virtualmente qualquer tipo de revestimento.

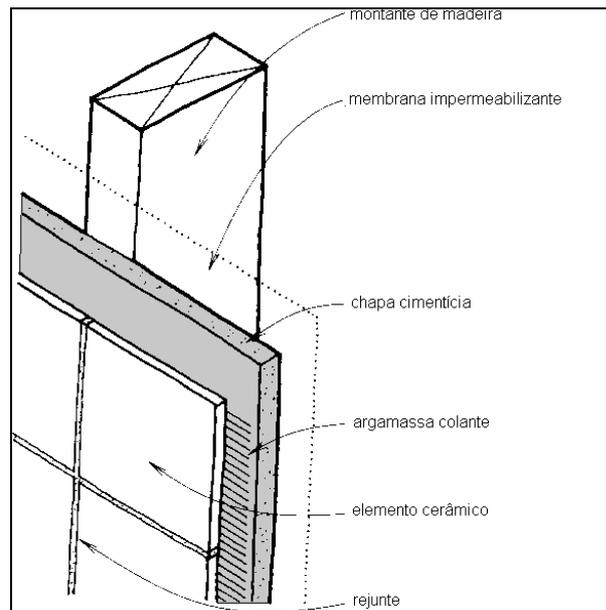


Figura 18 - Aplicação de elementos cerâmicos sobre chapa cimentícia fixada à ossatura em madeira (extraído de THALLON, 1997)

### 2.1.3 Composição dos Elementos de Piso

A trama estrutural do sistema de piso é formada por vigotas dispostas paralelamente, que se apóiam e são fixadas às fundações ou às paredes do pavimento inferior. A Figura 19 apresenta diferentes possibilidades. Dentre estas, a mais comumente empregada é a seção retangular maciça, embora ganhe cada vez mais espaço hoje em dia as vigotas de perfil “I”, formadas geralmente por mesas em madeira maciça e alma em chapa de madeira reconstituída, como Oriented Strand Board (OSB).

THALLON (2000), a partir de relatos de carpinteiros experientes, salienta que os perfis “I”, bem como as treliças de piso, são práticas para projetos com grandes vãos e traçado simples, porém mais difíceis de utilizar em edifícios complicados.

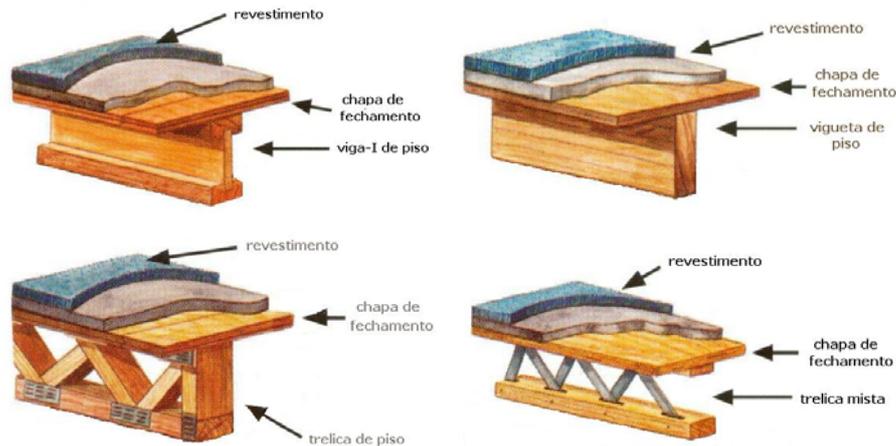


Figura 19 - Tipos mais comuns de seção transversal para as vigotas de piso (extraído e adaptado de <http://www.kmacmn.com>, acessado em 23/03/2003).

De acordo com SÁNCHEZ (1995), para edificações residenciais o espaçamento entre vigotas varia normalmente entre 400 e 600 milímetros, sendo preferível que este espaçamento coincida com o dos montantes de parede, para que haja transferência direta (sem excentricidade) das vigotas de piso para a travessa superior das paredes. Isto pode ser facilmente resolvido na fase de projeto da edificação.

Segundo FEIRER (1993), quando as vigotas de piso vencem vãos relativamente grandes, elas têm a tendência de perda de estabilidade lateral, quando solicitadas pelo carregamento vertical. Neste caso, são usados elementos denominados bloqueadores, posicionados entre vigotas adjacentes e com a finalidade de enrijecer a estrutura de piso, além de prevenir a flecha desigual de vigotas adjacentes e permitir que uma peça muito carregada receba alguma contribuição das vigotas vizinhas.

Após estarem posicionadas e fixadas às paredes, todas as vigotas de piso devem ser dispostas as chapas para fechamento. São usadas normalmente chapas de madeira reconstituída, com destaque para o OSB e o compensado. A fixação das chapas às vigotas é feita através de pregos ou parafusos. Segundo BREYER et al (2003), a aplicação de adesivos entre as chapas de fechamento e as vigotas de piso, logo antes da fixação dos pregos, auxilia na redução de rangidos

na estrutura de piso, além de proporcionar um ligeiro aumento da resistência e rigidez do conjunto.

O revestimento final dos pisos pode ser feito com diversos materiais de acabamento, que são assentados sobre a superfície plana formada pelas chapas de fechamento, tais como assoalho de madeira, elementos cerâmicos, carpete, dentre outros (BREYER et al, 2003).

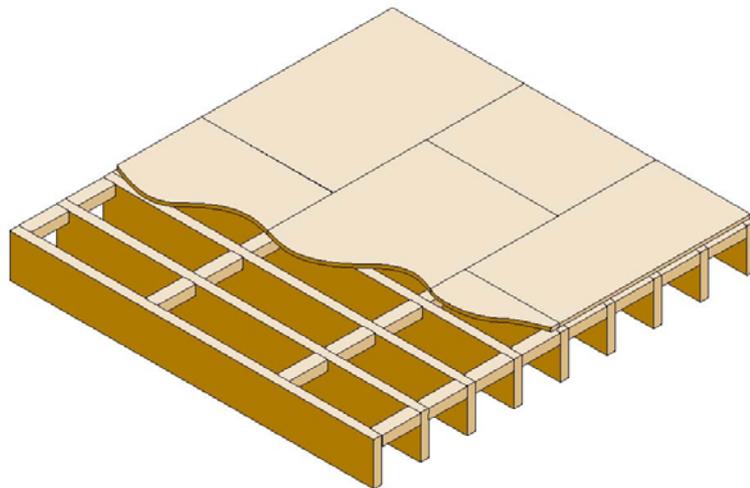


Figura 20 – Estrutura do elemento de piso, mostrando as vigotas com bloqueadores e as chapas de fechamento (extraído de APA, 1999).

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS ATRAVÉS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Busca-se neste tópico descrever os princípios estáticos que regem o Sistema Plataforma, mostrando a forma como as solicitações impostas à estrutura distribuem-se através dos elementos estruturais da edificação. Para isto, toma-se por base o livro *Design of Wood Structures*, de BREYER et al. (2003), acrescentando considerações de outros autores.

No projeto ordinário de uma edificação, os elementos estruturais estarão sujeitos e deverão ser dimensionados para suportar a ação de forças verticais (ex. gravitacionais; sobrecargas de utilização; etc) e de forças horizontais (ex. ação lateral de vento). Em determinados países, as solicitações horizontais também podem ser provenientes de furacões ou terremotos, o que não é

motivo de preocupação no Brasil. Portanto, ao longo do texto as solicitações horizontais estarão sendo consideradas como forças laterais de vento.

### 2.2.1 Ação de Forças Verticais

No sistema Plataforma, as solicitações verticais (permanentes e sobrecargas de utilização) incidem diretamente nos sistemas de piso e cobertura e são transmitidas à ossatura das paredes, que por sua vez descarregam nas fundações, definindo assim o caminho das forças verticais.

#### 2.2.1.1 Solicitações Verticais nos Elementos de Piso

As sobrecargas normais de utilização incidem diretamente sobre as chapas de fechamento do piso, existindo uma relação direta entre a espessura e orientação destas chapas e o espaçamento (vão) entre vigotas de piso (FAHERTY e WILLIAMSON, 1995). No dimensionamento destes elementos, pode-se eleger entre dois caminhos distintos:

- 1 - Especificar uma distância entre vigotas e então determinar a espessura mínima da chapa que seja capaz de vencer o vão formado; ou
- 2 - Especificar a espessura da chapa e determinar o vão máximo que ela pode vencer, isto é, determinar a distância máxima entre vigotas de piso.

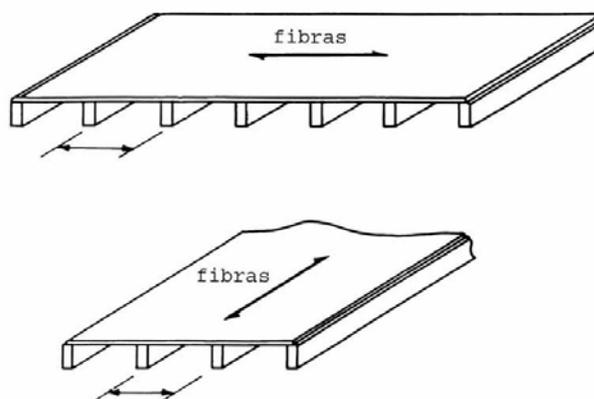


Figura 21 - Relação entre a orientação das chapas e o espaçamento entre vigotas de piso (FAHERTY e WILLIAMSON, 1995)

As vigotas de piso são dimensionadas à flexão simples, e estarão sujeitas normalmente (exceto em situações específicas, como, por exemplo, cargas pontuais provenientes de um equipamento) a um carregamento uniformemente distribuído, cuja área de abrangência é delimitada pela distância entre vigotas adjacentes e pelo seu comprimento.

As chapas de fechamento, dispostas e fixadas sobre as vigotas de piso, estarão submetidas a um carregamento distribuído sobre sua superfície, devendo ser dimensionadas à flexão. Dependendo da orientação das chapas em relação às vigotas (ver Figura 21), a APA – The Engineered Wood Association tem adotado as seguintes premissas, que valem para as práticas comuns de construção e para chapas de tamanho padrão:

a) Quando a direção longitudinal das chapas for perpendicular aos apoios:

- Adota-se a condição de três vãos, para distância entre apoios de até 32 in. (813 mm);
- Adota-se a condição de dois vãos, quando a distância entre apoios for maior que 32 in. (813 mm).

b) Quando a direção longitudinal das chapas for paralela aos apoios:

- Adota-se a condição de três vãos, para distância entre apoios de até 16 in. (406 mm);
- Adota-se a condição de dois vãos, para distância entre apoios entre 16 in. (406 mm) e 24 in. (610 mm);
- Adota-se a condição de vão simples, quando a distância entre apoios for maior que 24 in. (610 mm).

#### 2.2.1.2 Forças Verticais nos Elementos de Parede

As cargas que incidem sobre a estrutura de piso são descarregadas nos elementos de parede, através das vigotas de piso apoiadas diretamente sobre a travessa superior das paredes. As vigotas de piso, por serem dispostas em paralelo, fazem com que o piso de madeira funcione de forma análoga a uma laje de concreto armada numa só direção, isto é, distribuindo as cargas

somente às paredes sobre as quais as vigotas estejam diretamente apoiadas (paredes perpendiculares à direção das vigotas de piso).

As paredes paralelas à direção das vigotas de piso também podem estar submetidas a carregamento vertical, mas somente no caso de haver continuidade desta parede no pavimento logo acima. Neste caso, a parede inferior estará submetida ao peso próprio da parede acima, além de quaisquer solicitações transmitidas a esta por outros elementos estruturais, sejam de parede, piso ou cobertura.

O código norte-americano *Wood Frame Construction Manual* (WFCM, 1985) limita a altura das paredes em 10 ft. (3,0 m), para o caso de paredes portantes, e em 20 ft. (6,0 m) para paredes não portantes.

Nos elementos de parede submetidos a carregamento vertical, devem ser verificados os seguintes pontos (mostrados na Figura 22):

- Montantes verticais: devem ser dimensionados como pilares submetidos a carregamento axial, podendo eventualmente haver alguma pequena excentricidade na transmissão destas forças. É importante observar que as chapas de fechamento das paredes, fixadas aos montantes por meio de uma linha de pregos, impedem a flambagem dos montantes segundo o próprio plano da parede, permitindo que os montantes sejam dimensionados segundo seu eixo de maior inércia (BREYER et al, 2003). Cabe ressaltar que os montantes de paredes externas estarão submetidos também à ação de forças laterais de vento, devendo ser dimensionados para o esforço combinado de flexocompressão.
- Travessas inferior e superior: nos pontos de contato com os montantes da parede, estes componentes estarão sujeitos à compressão normal às fibras. Além disso, caso a modulação das vigotas de piso não coincida com a dos montantes da parede, estas estarão submetendo a travessa superior a esforço de flexão simples.
- Vergas de portas e janelas: nas paredes que suportam vigotas de piso, as vergas recebem carregamento vertical proveniente das vigotas situadas logo acima, que transmitem as solicitações do elemento de piso e também das paredes dos pavimentos superiores. Assim sendo, as vergas de portas e janelas devem ser dimensionadas como vigas biapoiadas submetidas a flexão simples. Quanto maior a abertura de porta ou janela, maior será o vão e conseqüentemente mais robusta será a verga.

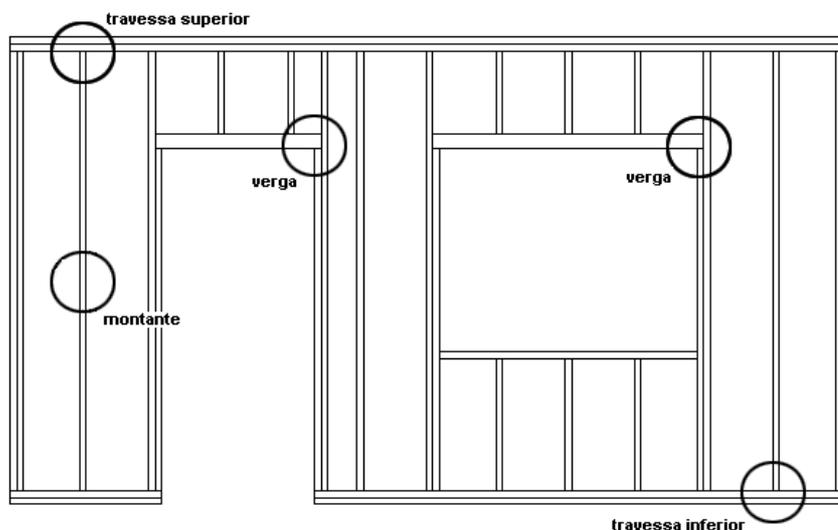


Figura 22 – Pontos da ossatura que devem receber atenção no dimensionamento quanto a cargas verticais.

### 2.2.2 Ação de Forças Horizontais

A distribuição das forças horizontais em sistemas leves em madeira, como o Sistema Plataforma, não é tão evidente quanto à das forças verticais. As estruturas de piso, parede e cobertura compreendem elementos especialmente projetados para resistir aos esforços laterais na edificação.

Conforme AMBROSE (1994), as forças laterais de vento incidem diretamente sobre as paredes transversais (perpendiculares à direção do vento), que recebem estas forças e as transferem para a fundação e para a estrutura de piso.

O elemento de piso é solicitado em seu próprio plano e encontra reação nas paredes estruturais (laterais), que por sua vez transferem os esforços para as fundações. A figura abaixo, modificada de FAHERTY e WILLIAMSON (1995), ilustra esta transferência de esforços através dos elementos estruturais da edificação.

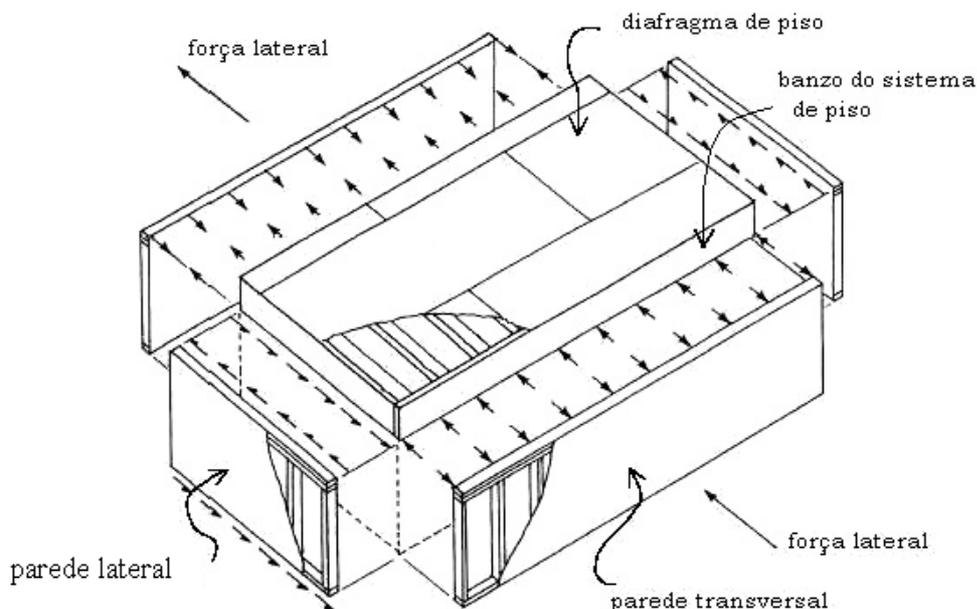


Figura 23 - Caminho das forças no sistema Plataforma (adaptado de FAHERTY e WILLIAMSON, 1995).

### 2.2.2.1 Paredes Transversais à Direção do Vento

A força lateral de vento incide diretamente sobre as paredes transversais à sua direção, originando um carregamento distribuído e normal à superfície destas paredes, que são fixadas à fundação (ou à estrutura de piso do pavimento inferior), através da travessa inferior, e à estrutura de piso do pavimento superior (ou à cobertura), através da travessa superior. Deste modo, os montantes verticais da ossatura de parede funcionam como vigas apoiadas em suas extremidades e sujeitas a carregamento distribuído, definido pela área de abrangência entre montantes (ver Figura 24). A distância entre os montantes da ossatura das paredes externas define o vão que deverá ser vencido pelas chapas de fechamento, que deverão ter suficiente resistência e rigidez para suportar as solicitações normais à sua superfície, impostas pela força de vento. A espessura das chapas deve ser determinada em função da magnitude destas forças. Os esforços de flexão devem ser verificados de modo análogo ao estipulado para as forças verticais sobre as chapas de fechamento do piso.

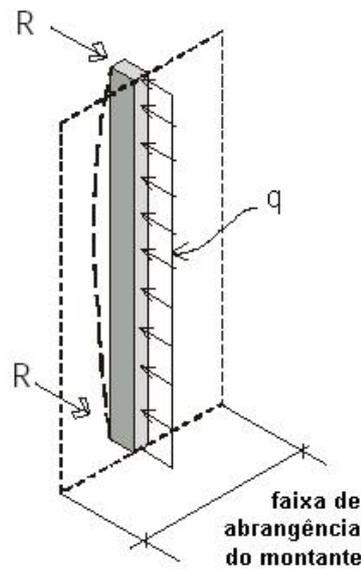


Figura 24 - Esquema da atuação da força lateral no montante (adaptado de Illinois Emergency Management Agency, 2000).

#### 2.2.2.2 Estrutura de Piso

As forças laterais incidentes na parede transversal são transmitidas à estrutura de piso, causando-lhe esforços em seu próprio plano. Conforme descrevem BREYER et al (2003), faz-se analogia entre o elemento de piso e uma viga “I” fletida, na qual as mesas do perfil correspondem aos banzos extremos do sistema de piso, e a alma corresponde à superfície composta pelas chapas de fechamento. Nesta hipótese simplificadora, os banzos do sistema de piso respondem integralmente pelas tensões axiais (tração e compressão) devido ao momento fletor atuante, enquanto que o cisalhamento é resistido pelas chapas de fechamento pregadas às vigotas de piso (ver Figura 25).

Segundo AMBROSE (1994), as travessas duplas dos elementos de parede têm o potencial de funcionar como os banzos (tração e compressão) do elemento de piso, absorvendo as tensões de tração e compressão. Para isto, é necessário que as travessas estejam devidamente conectadas à estrutura de piso e que tenham as emendas espaçadas, para permitir a continuidade na transferência das forças.

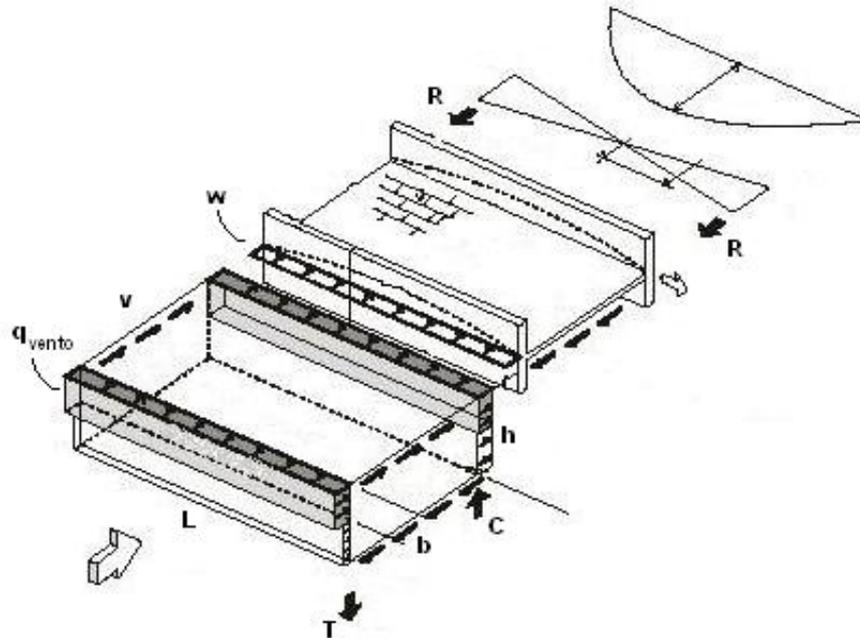


Figura 25 - Analogia entre o diafragma de piso e uma viga –I (Illinois Emergency Management Agency, 2000).

A força lateral distribuída atuante no plano do elemento de piso será:

$$w = \frac{q_{\text{vento}} \cdot (L \cdot h')}{L} = q_{\text{vento}} \cdot h'$$

onde:

w é a força distribuída no plano do elemento de piso, em N/m;

$q_{\text{vento}}$  é a força lateral de vento, em  $\text{N/m}^2$ ;

L é o comprimento da parede transversal, em metros;

$h'$  é a altura da área de abrangência relativa à parede transversal, em metros.

### 2.2.2.3 Paredes Estruturais (paralelas à direção do vento)

O elemento de piso, ao ser solicitado no seu próprio plano por carregamento oriundo da força lateral de vento, encontra apoio nas paredes estruturais, às quais está fixado na junção com a travessa superior. De forma simplificada, esta transmissão de esforços imprime às paredes um carregamento linear de topo, distribuído ao longo do comprimento da parede, sendo dado por:

$$v = \frac{R}{b}$$

onde:

v é a força linear no topo da parede, em N/m;

b é a largura da parede, em metros.

R é a reação de apoio da solicitação de piso, em Newtons, sendo dada por

$$R = \frac{w \cdot L}{2}$$

Quando há uma série de paredes estruturais em paralelo para receber as forças horizontais provenientes do piso, a forma de transferência destas forças para cada parede vai depender da rigidez relativa entre os elementos de piso e de parede. Conforme AMBROSE (1994), se o elemento de piso é relativamente flexível, ele deverá deformar-se tanto que sua continuidade será negligenciável e a distribuição das forças para as paredes (relativamente rígidas) se dará de forma essencialmente periférica. Por outro lado, se a estrutura de piso for relativamente rígida, a distribuição de forças será proporcional à rigidez relativa de cada parede (ver Figura 26).

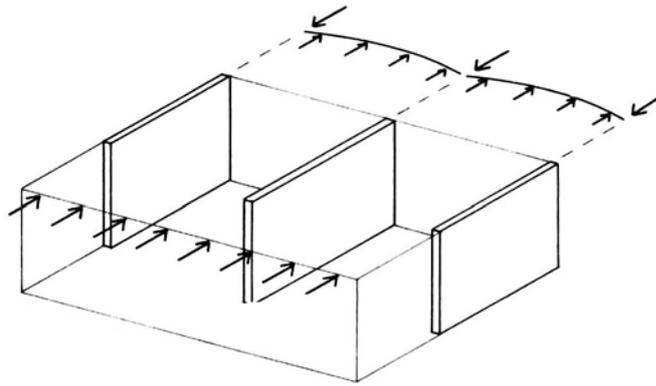


Figura 26 – Ilustração da distribuição das forças do piso para as paredes estruturais (adaptado de AMBROSE, 1994).

O *Residential Structural Design Guide* (2000) identifica diferentes métodos para a distribuição das solicitações laterais do piso para as paredes estruturais, dentre as quais pode-se destacar:

1 – Método da Área Tributária: considera que o diafragma de piso é flexível e que, portanto, as forças laterais são distribuídas às paredes em função da área tributária de cada parede, não levando em conta a rigidez de cada parede.

2 – Método da Rigidez Relativa: considera que o diafragma de piso é rígido, sendo a distribuição das forças proporcional à rigidez de cada parede.

KASAL et al (2004) consideram que, como pouco ainda se conhece a respeito de como as forças laterais são distribuídas e compartilhadas entre os elementos estruturais de um sistema complexo como o sistema Plataforma, a adoção de premissas simplificadoras pode resultar em elementos subdimensionados (baixa segurança) ou superdimensionados (anti-econômicos).

O *International Building Code* (IBC, 2000) adota o critério do deslocamento relativo entre o elemento de piso e as paredes estruturais, para determinar se o diafragma de piso é rígido ou flexível. O critério consiste em identificá-lo como rígido quando seu deslocamento central for menor que duas vezes o deslocamento de topo máximo permitido para o pavimento.

### 3 COMPORTAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS

Para fazer frente às solicitações laterais agindo no próprio plano, é necessário que as paredes estruturais sejam capazes de oferecer resistência e rigidez, conferindo estabilidade lateral à edificação. Há diferentes formas de se contraventar uma edificação, conforme MAYO (2001), ver Figura 27. A solução apresentada em (c) é inerente aos sistemas aporticados (ex. pilar-viga). Para os sistemas leves em madeira, há duas possibilidades de contraventamento: paredes cisalhantes, que utilizam chapas de uso estrutural; e contraventamento interno em diagonal, que pode ser feito com tábuas de madeira ou com tiras de aço, ambas dispostas em diagonal.

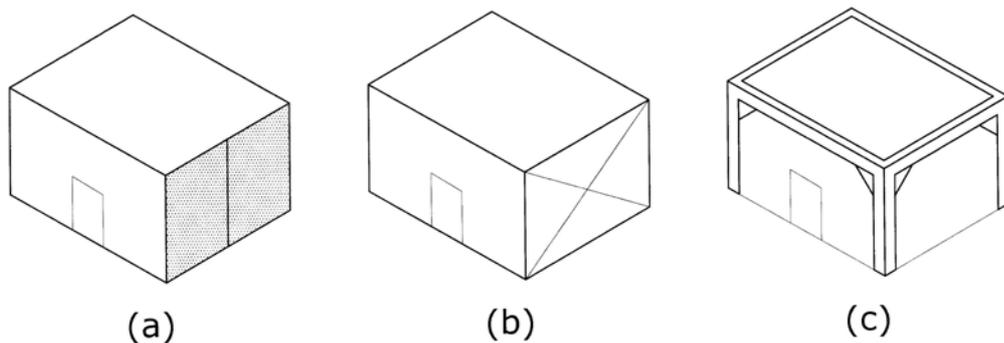


Figura 27 – Diferentes formas de contraventamento de uma edificação: (a) Paredes estruturais; (b) contraventamento interno; (c) pilar-viga.

AMBROSE (1994) considera que as estruturas leves em madeira são normalmente contraventadas com elementos planos que criam corpos tridimensionais na forma de caixas. Estas estruturas são formadas pelas paredes, pela cobertura e pelos elementos de piso, que são compostos pela ossatura em madeira e algum tipo de chapa de fechamento de uso estrutural. Quando estas chapas não forem usadas, pode-se recorrer a sistemas treliçados (contraventamento interno) para combater as forças horizontais. Nestes casos, o emprego de outros elementos de contraventamento farão com que os elementos da estrutura tenham função exclusiva de resistir às forças gravitacionais.

THALLON (2000) considera que os painéis de madeira revestidos com chapas estruturais de fechamento são capazes de resistir bem às forças laterais e contribuem para a rigidez global da edificação, eliminando a necessidade de contraventamentos internos na ossatura em madeira. Os contraventamentos internos são pouco empregados nos dias de hoje.

Como descrito na publicação da APA – DIAPHRAGMS and Shear Walls – Design and Construction Guide (2001), deve-se entender as paredes estruturais como espessas vigas em balanço, fixadas numa de suas extremidades às fundações e livre na outra (ver analogia na Figura 28). Devido ao comprimento da parede ser relativamente grande, e também ao modo de ligação empregado, seu comportamento difere ligeiramente ao da viga comum. As tensões de cisalhamento provaram-se essencialmente uniformes através da largura da parede, ao contrário da distribuição parabólica verificada nas vigas comuns. De forma análoga, os montantes de extremidade suportam todas as tensões de tração ou compressão exercidas pelas forças laterais agindo no plano da parede-diafragma.

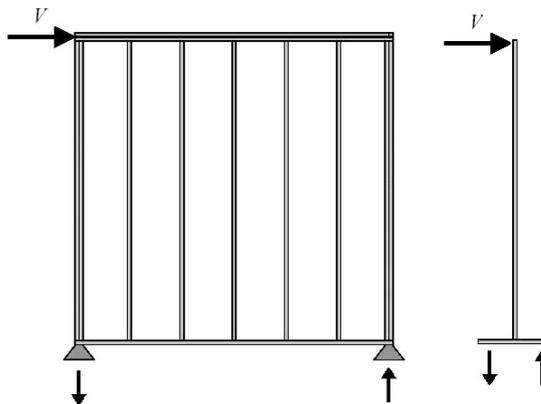


Figura 28 - Analogia entre a parede lateral e uma viga engastada e livre.

De acordo com AMBROSE (1994), há três funções importantes da parede lateral e que precisam ser observadas no projeto, para que o elemento tenha um desempenho satisfatório. São elas:

**a) Resistência ao giro:** a ação das forças laterais tende a provocar o giro da parede (ver Figura 29). Os montantes extremos da ossatura trabalham como os banzos de uma viga fletida, devendo ser capazes de resistir aos esforços de tração e compressão. Caso as forças gravitacionais não sejam suficientes para contrabalançar o efeito de giro da parede, devem ser previstos dispositivos

metálicos de ancoragem à fundação, que devem ser fixados aos montantes extremos da ossatura, impedindo que estes se desprendam da travessa inferior.

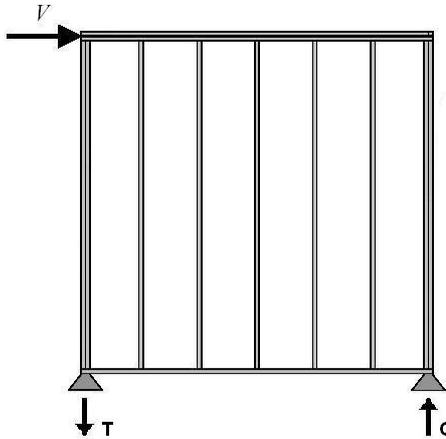


Figura 29 - Ação da força lateral tendendo a provocar o giro da parede.

A Figura 30 mostra alguns modelos de dispositivo de ancoragem da parede comercializados pela empresa The Simpson Co., dos Estados Unidos. Independentemente da forma como se apresentam, os dispositivos de ancoragem terão sempre a função de evitar que os montantes se desprendam e possam se separar da travessa inferior da parede.

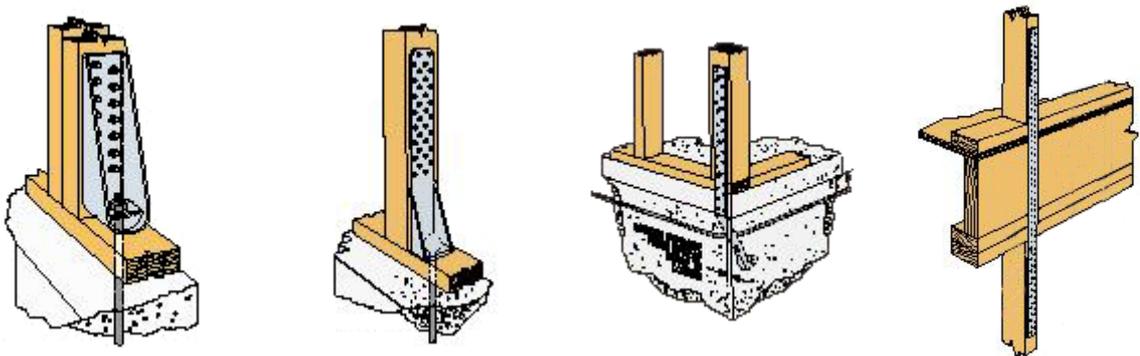


Figura 30 - Exemplo de aplicação do dispositivo de ancoragem (obtido de catálogo da empresa *The Simpson Co.*, Estados Unidos).

A força atuante nos montantes extremos da ossatura (tração ou compressão) será dada por:

$$T = -C = \frac{M_{\text{giro}}}{b}$$

onde:

T é a força no montante extremo tracionado, em N;

C é a força no montante extremo comprimido, em N;

b é a largura da parede;

$M_{giro}$  é o momento de giro da parede, sendo dado por:  $M_{giro} = R \cdot h = (v \cdot b) \cdot h$ ,

Onde:

h é a altura da parede;

R é o carregamento lateral resultante aplicado no topo;

v é o carregamento lateral distribuído por unidade de comprimento.

Portanto: 
$$T = -C = \frac{M_{giro}}{b} = \frac{(v \cdot b) \cdot h}{b} \therefore T = C = v \cdot h$$

**b) Resistência ao deslizamento horizontal:** a carga uniformemente distribuída ao longo da travessa superior deverá ser resistida pela parede lateral, que a descarrega nas fundações (ou no elemento de piso do pavimento inferior). As paredes têm que estar devidamente fixadas às fundações (ou à plataforma de piso do pavimento inferior), para evitar o seu deslocamento horizontal. A fixação de uma parede lateral à fundação é feita normalmente por meio de parafusos de fixação, que são deixados na fundação durante a concretagem e presos à travessa inferior das paredes. No caso das paredes apoiadas sobre elementos de piso, como por exemplo as situadas em pavimentos superiores, ou ainda quando a parede do térreo é apoiada sobre uma guia previamente parafusada à fundação, a fixação deve ser feita por meio de pregos cravados ao longo da travessa inferior destas paredes.

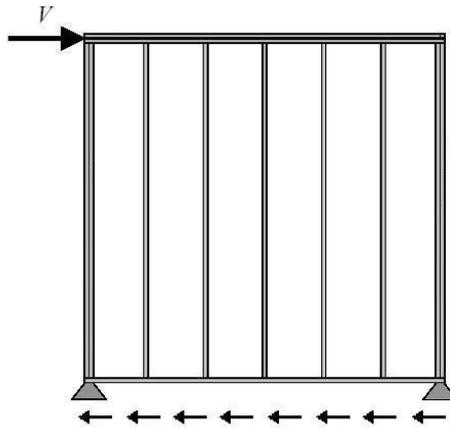


Figura 31 - Ação da força lateral tendendo a provocar o deslocamento horizontal da parede.

A rigor, a quantidade de parafusos de fixação ou de pregos numa parede deve ser determinada em função da resistência de cada conector solicitado lateralmente. Isto pode ser obtido através de ensaios experimentais relativamente simples. Na falta de dados, as medidas prescritivas contidas nos códigos de construção de outros países podem servir de base para a especificação destes elementos.

A quantidade de parafusos de fixação ( $N$ ) é dada por: 
$$N = \frac{R}{z'} = \frac{v \cdot b}{z'}$$

onde:

$z'$  é a resistência lateral do parafuso de fixação.

O espaçamento necessário entre parafusos de fixação ( $e$ ) será dado por:

$$e = \frac{b}{N} = \frac{b \cdot z'}{v \cdot b} = \frac{z'}{v}$$

**c) Resistência direta ao cisalhamento:** as forças que atuam no plano da parede geram forças cisalhantes, que se distribuem pelas ligações pregadas entre as chapas de fechamento e a ossatura em madeira.

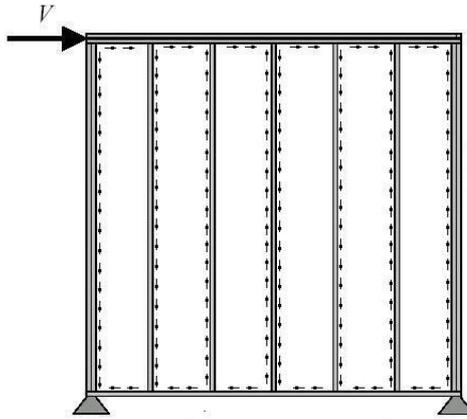


Figura 32 - Ação da força lateral provocando forças de cisalhamento no plano da parede-diafragma.

As chapas utilizadas nas paredes devem ser suficientemente rígidas para transmitir completamente os esforços de cisalhamento aos pregos, sem que ocorra o embutimento de sua cabeça através da chapa ou o seu rasgamento, e garantir estas características após vários ciclos de carregamento (NATTERER et al, 2004).

### 3.1 NÍVEIS DE ANCORAGEM E FIXAÇÃO DA PAREDE LATERAL

Conforme a prática construtiva adotada na fixação e ancoragem das paredes à fundação (ou aos elementos do pavimento inferior), podem ser definidos basicamente três níveis distintos de ancoragem:

- **Ancoragem de cada segmento plenamente fechado de parede:** em regiões onde ocorrem terremotos ou furacões, os códigos de construção prescrevem dispositivos metálicos de ancoragem ao final de cada segmento de parede totalmente fechado, ou seja, além da ancoragem dos montantes extremos, estes dispositivos de ancoragem são empregados também próximo às aberturas de portas e janelas. Além disso, devem ser usados parafusos de fixação para prevenir qualquer deslocamento horizontal da parede. Este nível de ancoragem é especificado para regiões onde ocorrem abalos sísmicos ou furacões. O emprego de inúmeros dispositivos de ancoragem numa edificação não é necessário para as condições climáticas brasileiras, e implica em aumento de custos e prazo de execução.
- **Ancoragem dos montantes extremos da parede:** são prescritos dispositivos metálicos de ancoragem somente nos montantes extremos da parede, e não mais ao final de cada segmento plenamente fechado. Devem ser previstos parafusos de fixação ao longo da travessa inferior, para impedir o deslocamento horizontal da parede;
- **Ancoragem convencional:** de acordo com NI e KARACABEYLI (2000), embora a maioria dos códigos de construção prescrevam o emprego de dispositivos de ancoragem, seu uso é muitas vezes negligenciado na construção convencional. Nestes casos, segundo JONES (1995), a prática construtiva consiste em deixar as paredes apenas fixadas à base, através dos parafusos de fixação ou somente através de pregos unindo a travessa inferior da ossatura à guia fixada à fundação através dos parafusos.

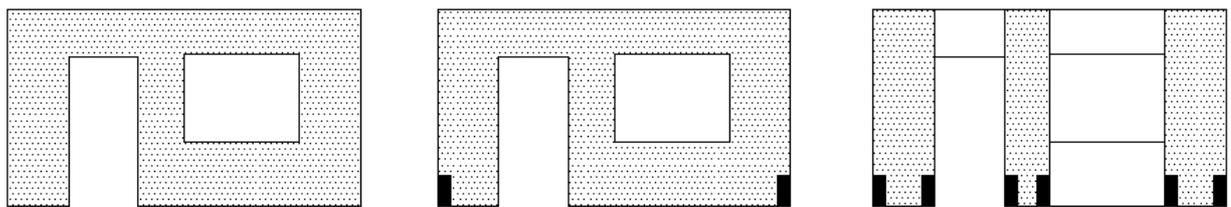


Figura 33 – Diferentes níveis de ancoragem e fixação das paredes estruturais: ancoragem convencional; ancoragem dos montantes extremos; ancoragem de cada segmento plenamente fechado.

## 3.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS

Existem determinados parâmetros que exercem influência direta no comportamento estrutural das paredes estruturais frente ao carregamento distribuído ao longo de sua travessa superior, podendo afetar sua resistência e rigidez. A seguir discorre-se sobre alguns parâmetros relevantes.

### 3.2.1 Comprimento das Paredes

O comprimento das paredes é um fator que tem relação com o projeto arquitetônico, mas que exerce influência direta na capacidade resistente de uma parede submetida a carregamento lateral. Quanto maior o comprimento, maior será a força suportada pela parede. PATTON-MALLORY et al (1985) encontraram linearidade entre a força e o comprimento, para relações altura/comprimento entre 1:1 e 1:3 (gesso acartonado) e entre 1:1 e 1:4 (compensado de madeira), porém em ensaios com protótipos em escala reduzida 1:3.

Entretanto, esta relação linear não é válida para paredes muito curtas, ou seja, a partir de determinado limite da relação altura/comprimento. Os códigos de construção norte-americanos dizem que, para um segmento de parede poder participar efetivamente da resistência frente às forças laterais, sua relação altura/comprimento não deve ultrapassar a proporção  $3\frac{1}{2} : 1$ , pois segmentos muito curtos não conseguem desenvolver sua capacidade resistente máxima ao cisalhamento.

SALENIKOVICH (2000) realizou ensaios em paredes com quatro diferentes comprimentos, variando de 2 ft. (0,60 m) a 12 ft. (3,60 m). Para paredes com ancoragem dos montantes extremos, houve linearidade para os três protótipos maiores, mas o protótipo curto (0,60 m) apresentou acentuada perda de rigidez e da carga linear.

### 3.2.2 Fixação e Ancoragem dos Painéis de Parede à Fundação

Como visto anteriormente neste capítulo, há diferentes formas de ancoragem e fixação das paredes. Os resultados dos diferentes trabalhos de pesquisa experimental, envolvendo ensaios de protótipos de parede em tamanho real, mostraram ao longo do tempo que a fixação das paredes à base para evitar seu deslizamento horizontal, seja através de parafusos de fixação ou pregos, não é um fator preocupante no desempenho das paredes. O deslocamento horizontal (deslizamento) da travessa inferior das paredes é geralmente negligenciável.

A publicação do NAHB – *The Performance of PSW with Narrow Wall Segments, Reduced Base Restraint and Alternative Framing Methods* (1998) mostra que, em resultados experimentais em que se variou o espaçamento entre parafusos de fixação de 2ft.(0,61m) para 6ft. (1,83m), em protótipos com ancoragem dos montantes extremos, foi encontrada pequena diferença quanto à força última e a rigidez inicial.

A ancoragem das paredes, por outro lado, pode afetar significativamente o desempenho das paredes estruturais, pois a ruptura mais perigosa que pode ocorrer numa parede lateral é a ruptura frágil à tração do montante tracionado ou de sua ancoragem à fundação (NATTERER et al., 2004).

Segundo BREYER et al (2003), a ancoragem do montante extremo tracionado é importante especialmente em casos de paredes com altura elevada, paredes curtas (valores elevados da relação altura/comprimento) ou ainda em paredes onde incidem forças verticais de pequena magnitude.

De acordo com HEINE (1997), os dispositivos de ancoragem melhoram o desempenho global das paredes estruturais. Paredes sem estes dispositivos exibem um pronunciado movimento de rotação de corpo rígido, havendo tendência de separação entre o montante extremo e a travessa inferior, impedindo que a capacidade máxima resistente ao cisalhamento seja alcançada. Entretanto, há determinados fatores que ajudam a contrabalançar os efeitos de rotação da parede, exercendo efeito de lastro, como por exemplo as forças gravitacionais agindo sobre a parede ou a interseção de paredes transversais de canto junto à extremidade da parede. Dependendo de sua magnitude, estes fatores podem dispensar o emprego dos dispositivos de ancoragem, sem prejuízo para o comportamento global da edificação.

A publicação do NAHB – Wood Shear Walls with Corners (2001) apresenta resultados de ensaios experimentais nos quais foram anexados cantos de parede junto às extremidades dos protótipos ensaiados. Os cantos de parede melhoraram o desempenho das paredes, fornecendo restrição parcial ao giro.

SALENIKOVICH (2000) realizou ensaios em paredes com variação do nível de ancoragem, para diferentes comprimentos. As paredes com ancoragem dos montantes extremos exibiram comportamento significativamente superior ao das paredes sem ancoragem.

### **3.2.3 Presença de Aberturas de Portas e Janelas**

A presença de aberturas de portas e janelas causa perda de resistência e rigidez nas paredes submetidas a carregamento lateral. Existem trabalhos de pesquisa que apresentam resultados de ensaios de paredes com aberturas de portas e janelas. Há também autores que desenvolveram modelos matemáticos e empíricos buscando a validação dos resultados experimentais. Entretanto, os dados de ensaio são relativamente escassos para se chegar a algum consenso. Além disso, as condições de ancoragem também afetam o comportamento das paredes com aberturas.

JOHNSON (1997) ensaiou paredes com 40 ft. (12,2 m) de comprimento e cinco diferentes arranjos de aberturas. Todos os protótipos continham dispositivos de ancoragem junto aos montantes extremos. O desempenho dos protótipos em termos de resistência e rigidez decaiu à medida em que diminuiu-se a taxa de aberturas ( $r$ ). Como exemplo, a força máxima de uma parede totalmente fechada (sem aberturas) foi 2,8 vezes maior do que uma parede com taxa de abertura  $r = 0,55$ , contendo uma porta e duas aberturas de janela.

A publicação NAHB – The Performance of Perforated Shear Walls with Narrow Wall Segments, Reduced Base Restraint, and Alternative Framing Methods (1998) apresenta os resultados de ensaios de paredes com 20 ft. (6,1 m) com diferentes arranjos de aberturas. Em paredes com ancoragem dos montantes extremos, a força máxima de uma parede com uma abertura de porta de garagem (3,6 m x 2,0 m) alcançou apenas cerca de 16% da força máxima de uma parede semelhante porém sem aberturas. Em outro ensaio, protótipos com mesma taxa de aberturas ( $r =$

0,57), porém com configurações diferentes (uma janela de 3,6 m x 1,2 m contra três janelas menores de 1,2 m x 1,2 m), mostraram curvas força-deslocamento muito semelhantes.

HEINE (1997) realizou ensaios em paredes com 40 ft. (12,2 m) de comprimento, três diferentes taxas de aberturas e diferentes níveis de ancoragem. Nas paredes totalmente fechadas, houve perda de resistência e rigidez quando se omitiram os dispositivos de ancoragem dos montantes extremos. O protótipo sem ancoragem alcançou 73% da força máxima da parede bem ancorada. Nas paredes com taxa de aberturas  $r = 0,48$  (contendo uma porta e duas aberturas de janela), o protótipo sem ancoragem resistiu 63% da força máxima do protótipo com ancoragem dos montantes extremos. No comparativo entre paredes com diferenças de ancoragem, a rigidez também decaiu quando foram omitidos os dispositivos de ancoragem.

### **3.2.4 Orientação das Chapas de Fechamento**

SERRETTE et al (1997) realizaram ensaios de força lateral (cisalhantes) em paredes com ossatura em perfis leves de aço, empregando chapas com orientação vertical e horizontal. O comportamento das paredes quando as chapas foram dispostas na horizontal foi essencialmente o mesmo das paredes com as chapas na vertical, desde que houvesse elementos bloqueadores na ossatura. Omitindo-se os bloqueadores, a capacidade resistente foi reduzida em mais de 50 por cento.

TISSELL (1993), após ensaios em paredes 8" x 8" (2440 mm x 2440 mm), concluiu que a resistência de paredes não bloqueadas depende da distância entre montantes, pois a ausência dos elementos bloqueadores faz com que o cisalhamento nesta região seja transferido aos pregos adjacentes a esta região, situados nos montantes verticais. Assim sendo, paredes não bloqueadas com distância entre montantes de 16 in. (406 mm) apresentaram resistência significativamente maior do que com distância entre montantes de 24 in. (610 mm), permanecendo inalterados os demais parâmetros. Em conseqüência, o autor sugere que o aumento da densidade de pregos nos montantes verticais, na região próxima à junção entre duas chapas, pode aumentar a capacidade resistente de paredes não bloqueadas.

### 3.2.5 Densidade de Pregos

A fixação das chapas à ossatura é feita por pregos ou parafusos. Esta fixação é importante, pois a rigidez e resistência da parede é proporcional ao espaçamento dos pregos (NATTERER et al., 2004).

Conforme GAUZIN-MÜLLER (1990), o espaçamento entre elementos de ligação exerce grande influência sobre a estabilidade da ossatura. Um estudo realizado pelo CTBA – Centre Technique du Bois e de l'Ameublement – sobre paredes submetidas a carregamento lateral, empregando compensados e painéis de partícula, mostrou que a pregação periférica tem um papel mais importante, para o contraventamento, do que a natureza ou espessura das chapas de fechamento. Ainda segundo o autor, a densidade corrente de pregos numa construção com ossatura em madeira deve prever um espaçamento máximo de 150mm na periferia, e de 300mm nos montantes intermediários.

LAM et al. (1997) realizaram um experimento que consistiu em fazer um reforço na pregação somente na periferia de uma parede composta por uma única chapa de OSB de grandes dimensões (2,4m x 7,3m), reduzindo nesta região a distância entre pregos de 152mm para 76mm. Como resultado, a parede apresentou resistência significativamente maior (52%) e também rigidez (21%), em comparação com a parede sem reforço da pregação.

Os códigos de construção da América do Norte especificam em suas tabelas de dimensionamento espaçamentos de prego variando entre 50mm e 150mm. A tabela 23-II-I-1, contida no *Uniform Building Code* (UBC, 1997), fornece valores de força admissível para paredes com diferentes configurações, onde se pode verificar que, variando-se o espaçamento periférico de 6” para 2” (de 150mm para 50mm), mantendo-se as demais variáveis fixas, a força de cisalhamento unitário admissível pode ser até 2,5 vezes maior.

É importante observar, contudo, que para distâncias entre pregos muito reduzidas, e particularmente quando são usados pregos de maior bitola, há perigo de fendilhamento da madeira, principalmente nos montantes verticais situados nas junções entre chapas, pois estes recebem pregação de ambas as chapas, concentrando muitos pregos numa peça relativamente estreita. Neste caso, a utilização de parafusos em vez de pregos pode ser uma boa opção (TISSELL, 1993).

### 3.2.6 Resistência e Rigidez da Ligação Pregada

Quando uma parede é submetida a carregamento lateral, os conectores metálicos que ligam a chapa de fechamento à madeira da ossatura se deformam e a ossatura distorce como um paralelogramo, ao passo que a chapa de fechamento se mantém no formato retangular. O carregamento externo é resistido pelos esforços absorvidos pelos conectores metálicos ao se deformarem (TUOMI e McCUTCHEON, 1978).

A transmissão dos esforços da ossatura em madeira para as chapas de fechamento é feita através dos diversos pregos distribuídos ao longo das arestas e também na região interna das chapas.

Segundo JOHANSEN (1949) apud STAMATO (2002), a resistência das ligações por pinos depende da resistência da madeira ao embutimento e da resistência do pino à flexão. Tanto o embutimento quanto a flexão do pino são plásticos, portanto a capacidade de força de um pino metálico pode ser formulada com base nesse comportamento.

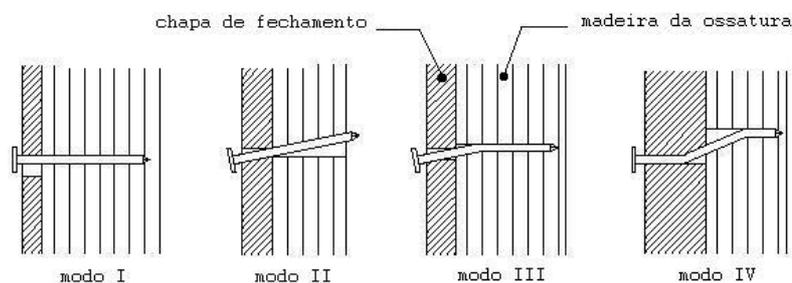


Figura 34 - Modos de falha da ligação pregada em cisalhamento simples (adaptado de STEWART apud HEINE, 1997)

A resistência ao embutimento está diretamente ligada à densidade da madeira e da chapa de fechamento. Conforme HEINE (1997), a densidade da madeira, correlacionada à resistência ao embutimento, é um dos fatores que mais influenciam no comportamento da ligação, e tem ligação direta com o tipo de falha ocorrida. Já a resistência à flexão do pino vai depender fundamentalmente do seu diâmetro e comprimento.

No caso das paredes estruturais, é portanto conveniente que haja uma relação balanceada entre o diâmetro e comprimento dos pregos especificados para a parede e a espessura da chapa de fechamento e a densidade da madeira da ossatura. Se forem utilizados pregos muito finos, haverá flexão precoce do pino, além de haver necessidade de uma densidade alta de pregos, o que pode ocasionar o fendilhamento da madeira. Por outro lado, a especificação de pregos de diâmetro

elevado pode não surtir o efeito desejado de ganho de resistência e rigidez, pois pode ocorrer falha precoce de rasgamento da chapa ao longo das arestas ou fendilhamento dos montantes.

### 3.2.7 Espaçamento entre Montantes e Espessura da Chapa de Fechamento

TISSSELL (1993) ensaiou protótipos de parede com distância entre montantes de 16in. (406mm) e 24in. (610mm). Os testes indicaram diferença de desempenho apenas para chapas mais finas, devido à possibilidade de flambagem das chapas. Não houve diferença de comportamento para chapas com espessura maior ou igual a 15/32in. (12mm).

O EUROCODE 5 (2002) estipula que, no dimensionamento de uma parede lateral, a flambagem da chapa de fechamento, devido às forças cisalhantes agindo no seu próprio plano, não precisa ser verificada, caso se obedeça à seguinte condição:  $\frac{b_{net}}{t} \leq 100$ , onde “ $b_{net}$ ” é a distância face a face entre montantes e “ $t$ ” é a espessura da chapa de fechamento.

### 3.2.8 Tipo da Chapa de Fechamento

SERRETTE et al (1997) compararam o desempenho de diferentes materiais para compor o fechamento de paredes com ossatura em perfis leves de aço, com boa fixação e ancoragem das paredes à base. As chapas foram fixadas a apenas uma das faces. Para um mesmo espaçamento de 152mm entre os conectores metálicos, os resultados mostraram o seguinte, tomando-se a força máxima do compensado como parâmetro de comparação:

Tabela 3 – Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento.

| Material de fechamento                                             | Comparativo da carga máxima |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Compensado 11,9mm, APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm | 100%                        |
| OSB 11,1mm APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm         | 88%                         |
| Gesso acartonado 12,7mm Hardirock – parafusos No. 6 x 25,4mm       | 38%                         |
| Fiberboard 12,7mm Fiberboind – parafusos No. 6 x 31,7mm            | 35%                         |

Conforme os resultados apresentados acima, as chapas de compensado e de OSB são capazes de fornecer maior resistência lateral às paredes. De acordo com FAHERTY e WILLIAMSON (1995), as chapas de madeira reconstituída vêm sendo empregadas com sucesso há mais de 50 anos como material estrutural. Este termo é usado para designar que uma das funções requeridas para o produto é a de resistir satisfatoriamente à ação de forças aplicadas externamente à chapa.

BREYER et al (2003) citam que as principais aplicações estruturais das chapas de madeira reconstituída são para fechamento de pisos, tetos e paredes, compondo elementos de piso e de parede, além de outros usos, tais como: composição de vigas e painéis sanduíche; cobrejuntas em ligações, como no caso de nós de pórticos; etc. No emprego em pisos e paredes, as chapas estruturais são elementos muito importantes, pois aliam as funções de fechamento e contraventamento, participando efetivamente da função de fornecer resistência e rigidez frente às forças verticais e laterais.

A certificação das chapas de madeira para uso estrutural, usadas no fechamento de edificações, possibilita a garantia de que as chapas empregadas na obra apresentarão um desempenho acima de valores mínimos estabelecidos. Em países com grande desenvolvimento do setor de habitações em madeira, a utilização de chapas estruturais certificadas é prática rotineira. Nas últimas décadas, foram desenvolvidas normas com o intuito de assegurar qualidade e confiabilidade às chapas de madeira reconstituída. A chapa de compensado, por ser a mais tradicional ao longo do tempo para emprego estrutural, se tornou o padrão segundo o qual o desempenho de outros produtos é julgado (FAHERTY e WILLIAMSON, 1995).

Há dois tipos de normas para a certificação de chapas de madeira para fechamento de pisos e paredes. O primeiro tipo consiste de normas centradas no produto, que descrevem as matérias-primas que podem ser usadas na manufatura, especificando características e propriedades mínimas para que o produto possa ser aceito. Estas especificações não têm relação direta com o desempenho em uso. São exemplos deste tipo as normas ANSI A208.1-93 – Mat-formed Wood Particleboard – e PS 1-95 – Construction and Industrial Plywood.

O outro tipo de norma especifica níveis de desempenho em serviço para um determinado produto, e não busca regulamentar a fabricação das chapas. Neste caso, são especificados critérios de desempenho que devem ser verificados através de métodos de ensaio que possuem uma relação direta com a expectativa de uso final do produto. São exemplos deste tipo de norma os documentos PS 2-92 – Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels – e PRP-

108 – Performance Standards and Qualification Policy for Structural-Use Panels, na América do Norte, e a norma UNE-EN 300 – Tableros de Virutas Orientadas (OSB): definiciones, clasificación y especificaciones, na Europa.

A existência de diversos produtos alternativos no mercado faz com que as normas baseadas no desempenho tenham um alcance maior. Por isto, estas normas têm tido maior ênfase atualmente, pois simplificam as decisões de projeto e permitem a seleção de um produto, dentre diversas alternativas, situados numa base comum.

### **3.3 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES ESTRUTURAIS**

Na América do Norte, onde o Sistema Plataforma foi desenvolvido e continua sendo o padrão de construção de residências unifamiliares e de pequenos edifícios comerciais e residenciais, a prática de dimensionamento está pautada no uso de tabelas, que, de acordo com BREYER et al (2003), são elaboradas por órgãos oficiais e adotadas pelos códigos de construção, como o UBC (1997) – *Uniform Building Code* –, ou em publicações de entidades como a APA – *The Engineered Wood Association*. A elaboração destas tabelas é baseada principalmente em resultados de ensaios experimentais em laboratório, acumulados ao longo de décadas.

No Brasil, assim como na Europa, o enfoque de dimensionamento de qualquer elemento estrutural é baseado em modelos matemáticos, baseados em princípios mecânicos, ou em modelos empíricos, obtidos a partir de experiências práticas em laboratório. Deste modo, os modelos de dimensionamento contidos nos livros e nas normas fornecem equações que são usadas para o cálculo destes elementos estruturais.

No caso das paredes de sistemas leves em madeira submetidas a carregamento lateral, alguns estudiosos norte-americanos e europeus vêm trabalhando no desenvolvimento de modelos matemáticos ou empíricos para o cálculo da resistência e rigidez das paredes estruturais. Em virtude da complexidade do tema, devido ao comportamento não-linear destes elementos, e da influência que determinados detalhes construtivos podem exercer sobre o comportamento das paredes, os modelos propostos costumam se basear em premissas simplificadoras. Isto acaba

gerando resultados aproximados, e é preciso estar atento à aplicabilidade de cada modelo proposto, bem como de suas limitações.

A seguir são apresentados alguns modelos para predição da resistência e rigidez de paredes de sistemas leves em madeira submetidas a carregamento lateral. Os modelos diferem em razão de dois fatores: presença ou não de aberturas e variação do nível de ancoragem das paredes.

### 3.3.1 Modelo do EUROCODE 5

O Eurocode 5 (2002) recomenda um método simplificado para o cálculo da resistência de uma parede lateral. Algumas premissas devem ser observadas, para a validade do método:

- As paredes devem estar devidamente fixadas e ancoradas à fundação (dispositivos especiais de ancoragem prendendo os montantes extremos à base);
- O espaçamento entre pregos é constante ao longo do perímetro de cada chapa;
- A largura de cada painel corresponde a pelo menos  $\frac{1}{4}$  da altura.

A principal limitação diz respeito à condição imposta de utilização de dispositivos especiais de ancoragem prendendo os montantes extremos à fundação (ou ao pavimento inferior), pois, na prática, é bastante comum a construção de edificações onde o emprego destes dispositivos é negligenciado.

A capacidade resistente da parede às forças laterais ( $F_{v,Rd}$ ) pode ser determinada usando-se o método simplificado de análise descrito a seguir, sendo as paredes constituídas de um ou mais segmentos, em que cada segmento consiste de uma chapa fixada a um lado da ossatura de madeira.

A resistência da parede às forças laterais ( $F_{v,Rd}$ ) é dada por:  $F_{V,Rd} = \sum F_{i,V,Rd}$ ,

onde:

$F_{i,v,Rd}$  é a resistência de cada painel.

A resistência de cada painel é dada por:  $F_{i,V,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot c_i}{s}$ ,

onde:

$F_{f,Rd}$  é a resistência lateral de cada conector;

$b_i$  é a largura de cada painel;

$s$  é o espaçamento entre pregos na periferia das chapas;

$c_i$  é um valor dado por:  $c_i = 1$  para  $b_i \geq b_0$

$$c_i = b_i / b_0 \text{ para } b_i < b_0$$

onde:

$$b_0 = h / 2$$

$h$  é a altura da parede.

### 3.3.2 Modelo de Sugiyama

De acordo com NI e KARACABEYLI (2000), o professor Hideo Sugiyama, da Universidade de Tóquio, idealizou em 1981 um método alternativo que propunha uma equação empírica para o cálculo da resistência e rigidez das paredes estruturais com aberturas, nas quais eram usados dispositivos especiais de ancoragem somente nas extremidades.

O assim chamado Método das Paredes Estruturais Perfuradas (*Perforated Shear Wall Method*), de acordo com LINE (2002), é adotado por alguns dos principais códigos de construção norte-americanos, tais como *International Building Code* (IBC, 2000), *AF&PA's Wood Frame Construction Manual for One-and Two-Family Dwellings* (WFCM, 1995), *Standard Building Code* (SBC, 1994) e *2000 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings* (FEMA, 2000).

Segundo LINE e BRADFORD (1996), o método consiste numa combinação de medidas prescritivas e fatores de ajuste de caráter empírico. Os fatores de ajuste fornecem um valor que representa uma razão entre a resistência e rigidez da parede com aberturas em relação a uma parede de mesma configuração, porém sem aberturas. A capacidade resistente de uma parede com ancoragem somente das extremidades é nitidamente menor que a de uma parede semelhante, porém contendo dispositivos de ancoragem ao final de cada segmento (recomendada para áreas sujeitas a abalos sísmicos). Entretanto, a capacidade resistente alcançada é plenamente satisfatória para as aplicações correntes, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de dispositivos de ancoragem, trazendo significativa redução do número de dispositivos de ancoragem e também do tempo de instalação, o que se traduz em redução de custos.

BRADFORD e SUGIYAMA (1994), fazendo um histórico das pesquisas que levaram à concretização do Método das Paredes-diafragma Perfuradas, citam que, em 1993, SUGIYAMA e MATSUMOTO propuseram um procedimento para a avaliação dos efeitos das aberturas na resistência e rigidez das paredes estruturais, que foram aplicados aos resultados de ensaios experimentais feitos por WAKATSUKI, em 1981, e por UCHIDA, em 1982. Mais adiante, em 1994, a *American Plywood Association* conduziu uma série de ensaios em protótipos de parede em tamanho real, para validação do modelo. As diferenças entre os resultados obtidos nos ensaios e os estimados pelo método desenvolvido por Sugiyama estiveram dentro da faixa de dez por cento.

As equações de Sugiyama foram desenvolvidas a partir de resultados de ensaios em protótipos de paredes em escala 1:3. Este método apresenta uma seqüência de índices intermediários a serem calculados para, ao final, obter-se o Fator de Redução (F) para ajuste da capacidade resistente da parede-diafragma com aberturas.

A seguir são apresentadas as equações de Sugiyama:

Índice da Área de Aberturas ( $\alpha$ ): é a razão entre a soma das áreas de aberturas e a área total da parede.

$$\alpha = \frac{A_{aberturas}}{A_{parede}} = \frac{A_{aberturas}}{H \times L}$$

onde:

$\alpha$  é o Índice da Área de Aberturas;

L é o comprimento da parede;

H é a altura da parede.

Índice do Comprimento da Parede ( $\beta$ ): é a razão entre a soma do comprimento dos segmentos de parede sem aberturas (totalmente fechados) e o comprimento total da parede.

$$\beta = \frac{\sum L_i}{L}$$

onde:

$\beta$  é o Índice do Comprimento da Parede;

$\sum L_i$  é o somatório do comprimento dos segmentos totalmente fechados;

L é o comprimento da parede.

No Método das Paredes-diafragma Perfuradas, os dois índices descritos acima são combinados num terceiro parâmetro, denominado Taxa de Aberturas ( $r$ ), que é dado por:

$$r = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\right)}$$

onde:

$r$  é a Taxa de Aberturas;

$\alpha$  é o Índice da Área de Aberturas;

$\beta$  é o Índice do Comprimento da Parede.

A partir do Coeficiente de Aberturas ( $r$ ) e fixando-se a deformação angular, pode ser obtido o Fator de Redução ( $F$ ) da resistência ou rigidez da parede lateral, através da seguinte equação:

$$F = \frac{r}{(3 - 2 \cdot r)}$$

onde:

$F \rightarrow$  Fator de Redução para ajuste da capacidade resistente da parede lateral com aberturas;

$r \rightarrow$  Taxa de Aberturas.

O último passo na equação empírica de Sugiyama é aplicar o fator de redução ( $F$ ) sobre a capacidade resistente e a rigidez de uma parede com mesma configuração, porém sem aberturas.

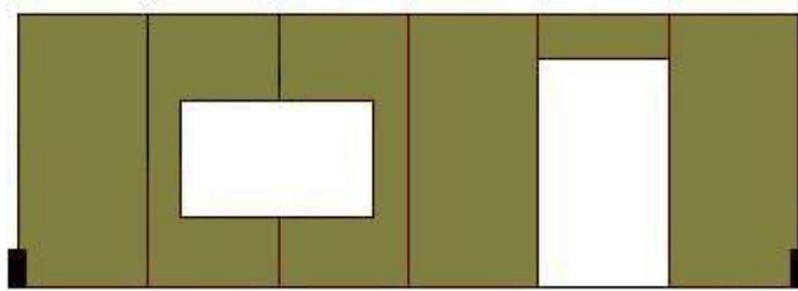


Figura 35 – Enfoque do Método da Parede Perfurada, mostrando os dispositivos de ancoragem apenas nas extremidades da parede.

De acordo com HEINE (1997), a equação acima para o cálculo do Fator de Redução (F) foi concebida para prever a capacidade máxima resistente das paredes com aberturas. No modelo original, esta equação foi introduzida para paredes cujo ângulo de deformação era de 1/100 radianos. Mais adiante, SUGIYAMA e MATSUMOTO apud HEINE (1997) propuseram equações adicionais para prever a capacidade resistente das paredes para deformações angulares de 1/300 radianos e 1/60 radianos, conforme a seguir:

- Para deformação angular de 1/300 rd (equivalente a 8mm para uma parede de altura

$$H=2440\text{mm}): F = \frac{3 \cdot r}{(8 - 5 \cdot r)}$$

- Para deformação angular de 1/60 rd (equivalente a 40mm para uma parede de altura

$$H=2440\text{mm}): F = \frac{r}{(2 - r)}$$

### 3.3.3 Modelo Analítico de NI e KARACABEYLI

NI e KARACABEYLI (2000) propõem este método, baseado em princípios da estática, para a determinação da capacidade resistente de paredes sem ancoragem dos montantes extremos. O método fornece um fator de redução a ser aplicado na capacidade resistente de uma parede plenamente ancorada (dispositivos de ancoragem aplicados nos montantes extremos).

O parâmetro ( $\phi$ ) leva em consideração o grau de ancoragem da parede, que pode ter seu movimento de giro parcialmente impedido em função de determinados fatores externos, tais como cargas provenientes de peso próprio, cargas verticais ou mesmo ajuda de paredes transversais de canto.

Segundo este método, quando o montante extremo não está ancorado, a força de tração agindo no montante é resistida pelas ligações pregadas ao longo da travessa inferior. Partindo da premissa de que a parede lateral atinge sua capacidade resistente quando todos os pregos ao longo da travessa inferior atingem sua capacidade limite ( $C_N$ ), tem-se, baseado em forças de equilíbrio, a seguinte equação (o artigo original apresenta a dedução da equação):

$$\alpha = \sqrt{1 + 2 \cdot \phi \cdot \gamma + \gamma^2} - \gamma$$

onde:

$\alpha$  é o fator de redução da capacidade resistente da parede sem dispositivos de ancoragem, em comparação com uma parede de configuração idêntica, porém com ancoragem dos montantes extremos;

$\gamma$  é a relação altura/comprimento da parede;

$\phi$  é definido como o efeito da restrição à separação do montante tracionado. O valor de ( $\phi$ ) será igual a 1 se forças agindo sobre a parede forem capazes de oferecer restrição à separação do montante tracionado, e será igual a zero quando não houverem forças capazes de proporcionar alguma ação de ancoragem do montante. O coeficiente ( $\phi$ ) é dado por:  $\phi = \frac{P}{M \cdot C_N}$ , onde:

$P$  é a restrição parcial à separação do montante tracionado, resultante do auxílio das seguintes forças: cargas provenientes de pavimentos superiores; carga devido a peso próprio; efeito de ancoragem dado por parede perpendicular junto à extremidade tracionada. Se o valor de ( $P$ ) for menor que zero, haverá necessidade de se empregar um dispositivo de ancoragem;

$M$  é o número total de pregos ao longo do montante extremo tracionado;

$C_N$  é a resistência máxima da ligação pregada à solicitação lateral

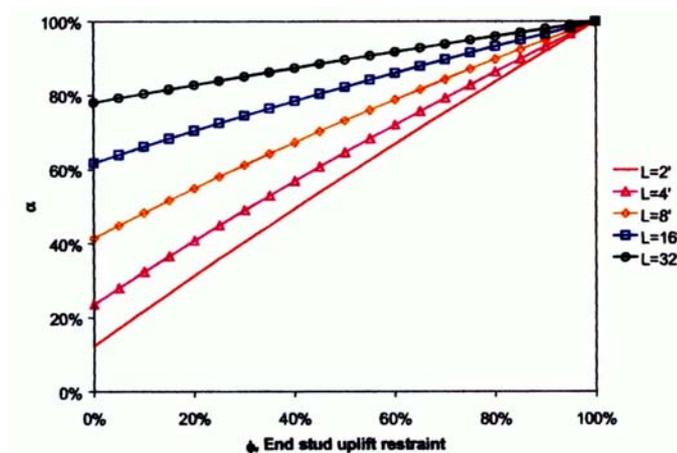


Figura 36 - Diagrama do modelo matemático de NI e KARACABEYLI.

### 3.3.4 Modelo Empírico de NI e KARACABEYLI

NI e KARACABEYLI (2000) obtiveram, a partir de ensaios experimentais em paredes com ou sem dispositivos especiais de ancoragem junto aos montantes extremos, um modelo de caráter empírico, que fornece resultados semelhantes ao seu modelo matemático. Com base nestes

ensaios, obtiveram a seguinte equação:  $\alpha = \frac{1}{1 + \frac{H}{L} \cdot (1 - \phi)^n}$ , onde:

$\alpha$  é o fator de redução da capacidade resistente da parede sem dispositivos de ancoragem, em comparação com uma parede de configuração idêntica, porém com ancoragem dos montantes extremos ;

H é a altura da parede;

L é o comprimento da parede;

$\phi$  é definido como o efeito da restrição à separação do montante tracionado, de modo

análogo ao definido em 3.3.3:  $\phi = \frac{P}{M \cdot C_N}$ .

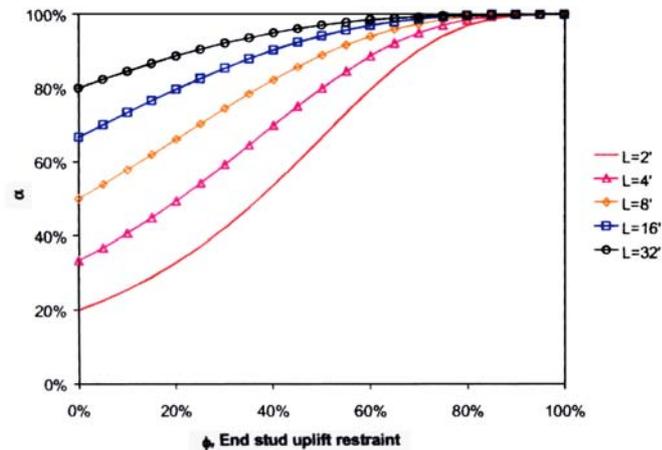


Figura 37 - Diagrama do modelo empírico de NI e KARACABEYLI

### 3.3.5 Cálculo do Deslocamento de Topo da Parede

A maioria dos códigos norte-americanos adota a mesma fórmula para o cálculo da deformação de topo de uma parede solicitada lateralmente. Esta fórmula, segundo SKAGGS e MARTIN (2004), embora desenvolvida há mais de 30 anos, continua fornecendo valores razoáveis, se comparados a resultados de ensaios experimentais. A equação é composta por quatro membros, que são baseados em princípios teóricos e variáveis empíricas, sendo válida somente para paredes sem aberturas de portas e janelas, bom nível de ancoragem (dispositivos de ancoragem prendendo os montantes extremos) e pregação uniforme ao longo das arestas das chapas.

Os quatro membros da equação correspondem, respectivamente, à parcela de deslocamento devido à flexão dos montantes extremos, à deformação de cisalhamento das chapas de fechamento, à deformação da parede devido à ligação pregada entre chapa e madeira da ossatura e, finalmente, ao deslocamento da parede devido à separação do montante extremo tracionado.

$$\Delta = \frac{2.v.h^3}{3.E.Ab} + \frac{v.h}{G_v.t_v} + \frac{h.e_n}{406,7} + \frac{h}{b}.d_a$$

onde:

$\Delta$  é a deformação no topo da parede, em mm;

$v$  é a força horizontal por comprimento atuando no topo da parede, em N/mm;

- h      é a altura da parede, em mm;
- E      é o módulo de elasticidade da madeira, em MPa;
- A      é a área da seção transversal dos montantes extremos, em mm<sup>2</sup>;
- b      é a largura da parede, em mm;
- G<sub>v</sub>    é o módulo de rigidez da chapa de fechamento, em MPa;
- t<sub>v</sub>    é a espessura da chapa de fechamento, em mm;
- e<sub>n</sub>    é a deformação da ligação pregada, em mm;
- d<sub>a</sub>    é o deslizamento do montante ancorado em relação à base, em mm.

## 4 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Segundo HE et al. (1997), embora o sistema Plataforma seja comprovadamente viável economicamente e tenha comportamento estrutural eficiente, especialmente para edificações residenciais, sua integridade estrutural sob ação de fenômenos como o vento não está necessariamente garantida, principalmente no caso de edifícios de mais de um pavimento e quando há presença de aberturas de portas e janelas.

De fato, a construção de paredes de edificações em sistema leve em madeira no Brasil precisa ter o respaldo de pesquisas que permitam compreender melhor os mecanismos de ação destes elementos de parede, quando solicitados lateralmente, além de subsídios em termos de resultados experimentais para dar respaldo à sua utilização com segurança. Para isso, os ensaios experimentais devem ser feitos levando em consideração as diferentes práticas construtivas de fixação e ancoragem das paredes, bem como os insumos encontrados no mercado brasileiro, principalmente no que se refere às espécies de madeira, às chapas de madeira reconstituída com capacidade estrutural e aos pregos fabricados no Brasil.

Dentro deste contexto, foi estabelecida uma metodologia para avaliação experimental, que teve por objetivo obter resultados de ensaios em protótipos de paredes de madeira, em tamanho real, solicitados lateralmente ao longo da travessa superior. Esta avaliação experimental desenvolveu-se em três etapas:

- Etapa inicial: caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- Etapa de ensaio das ligações: determinação das características de desempenho da ligação pregada representativa da união entre chapa de fechamento e madeira da ossatura;
- Etapa de ensaio das paredes: determinação das características de desempenho (resistência e rigidez) de um conjunto de paredes estruturais com diferentes configurações.

## 4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

### 4.1.1 Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

A madeira que compõe a ossatura dos protótipos de parede ensaiados lateralmente foi obtida através de parceira com empresa privada. A madeira provém de um lote heterogêneo, composto por madeira de *Pinus spp* com idades variando de 12 a 30 anos, retiradas de florestas plantadas da região de Lages, Santa Catarina. As peças apresentavam um bom aspecto visual, com incidência relativamente baixa de nós, bem aparelhadas e com número reduzido de peças defeituosas (peças com curvatura acentuada ou presença de nós comprometedores ou em grande quantidade).

Do lote recebido foram retiradas aleatoriamente 12 barrotes para determinação da densidade (básica e aparente) e da umidade da madeira, que foram obtidos de acordo com as prescrições do anexo B da norma brasileira NBR-7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (1997). A Tabela 4 apresenta os valores médios, desvio-padrão, coeficiente de variação, bem como os valores máximo e mínimo destas duas propriedades.

Tabela 4 - Propriedades físicas da madeira de *Pinus spp*

| Propriedade                                   | Valor Médio | Desvio-padrão | Coeficiente de Variação | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|-----------------------------------------------|-------------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Densidade Básica*<br>(kgf/m <sup>3</sup> )    | 389,5       | 47,6          | 12%                     | 297          | 452,5        |
| Densidade Aparente**<br>(kgf/m <sup>3</sup> ) | 461,8       | 60,1          | 13%                     | 346,1        | 550,7        |
| Teor de Umidade (%)                           | 9,4         | 0,7           | 7%                      | 8,7          | 11,2         |

\* Densidade Básica: razão entre a massa seca e o volume saturado.

\*\* Densidade Aparente: por definição, é a razão entre a massa a 12% e o volume a 12% de umidade (entretanto, foi determinada para a umidade média do lote, igual a 9,4%).

Foi feita uma caracterização das propriedades mecânicas da madeira, onde foram determinadas as características de resistência e rigidez quanto à compressão paralela às fibras e à flexão simples, bem como a resistência à tração paralela às fibras e ao cisalhamento. Foram tomados aleatoriamente 12 barrotos, dos quais foram extraídos todos os corpos-de-prova. As propriedades foram obtidas de acordo com as prescrições no anexo B da NBR-7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (1997), à exceção do ensaio de cisalhamento, para o qual foi adotado um corpo-de-prova semelhante ao da norma francesa, proposto por SZÜCS et al. (1998 e 2004). A Tabela 5 apresenta os valores médios, desvio-padrão, coeficiente de variação, bem como os valores máximo e mínimo das propriedades obtidas.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da madeira de *Pinus spp*

| Propriedade         |                   | Valor Médio | Desvio-padrão | Coeficiente de Variação | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|---------------------|-------------------|-------------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Compressão Paralela | Resistência (MPa) | 39,5        | 11,7          | 30%                     | 21,2         | 54,1         |
|                     | Rigidez (MPa)     | 12002       | 3596          | 30%                     | 7242         | 17807        |
| Flexão simples      | Resistência (MPa) | 72,5        | 18,3          | 25%                     | 49,8         | 107,3        |
|                     | Rigidez (MPa)     | 12612       | 3198          | 25%                     | 7685         | 20430        |
| Tração paralela     | Resistência (MPa) | 77,7        | 18,4          | 24%                     | 47,7         | 108,1        |
| Cisalhamento        | Resistência (MPa) | 4,1         | 0,5           | 12%                     | 3,2          | 5,0          |

O coeficiente de variação elevado confirma a heterogeneidade do lote de madeira doado para a pesquisa. Entretanto, este problema não pôde ser contornado, tendo-se tomado o cuidado ao menos de se descartar as peças com presença acentuada de defeitos.

#### 4.1.2 Propriedades Mecânicas das Chapas de Fechamento

É importante a utilização de chapas de fechamento para uso estrutural, para se ter a garantia de bom desempenho em uso. Por constituir um produto inovador no mercado brasileiro, e por ser um tipo de produto com emprego consagrado internacionalmente para o fechamento de paredes de sistemas leves em madeira, optou-se em empregar nesta pesquisa chapas de OSB – *Oriented Strand Board* – fabricadas no Brasil, que foram obtidas através de parceria com empresa privada. O lote é composto por chapas de OSB de tamanho padrão (1220 mm x 2440 mm), fabricadas em Ponta Grossa, Paraná. Estas chapas de madeira reconstituída são fabricadas numa unidade industrial moderna, com rigoroso controle de produção, resultando num material bastante homogêneo.

Do lote recebido foram retiradas aleatoriamente oito chapas para determinação das seguintes propriedades mecânicas:

- Resistência e rigidez à flexão longitudinal, obtidos de acordo com as prescrições da norma ASTM D3043 (1995) – *Standard methods of testing structural panels in flexure*:

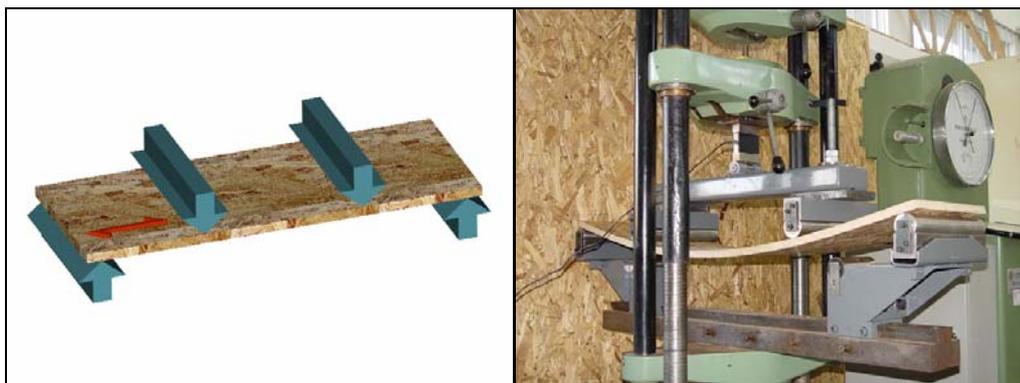


Figura 38 - Ensaio de flexão longitudinal da chapa de OSB.

- Resistência e rigidez à flexão transversal, obtidos de acordo com as prescrições da norma ASTM D3043 (1995) – *Standard methods of testing structural panels in flexure*:

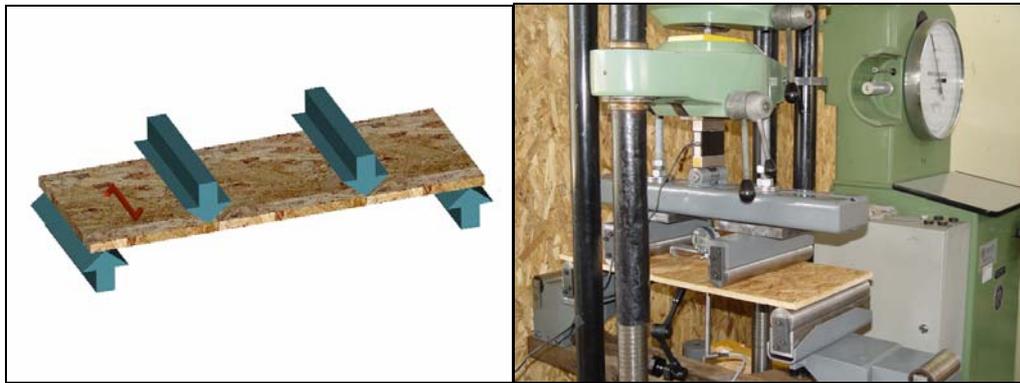


Figura 39 - Ensaio de flexão transversal da chapa de OSB.

- Resistência e rigidez à flexão vertical, obtidos de acordo com as prescrições da norma ASTM D3043 (1995) – *Standard methods of testing structural panels in flexure*:



Figura 40 - Ensaio de flexão vertical da chapa de OSB.

- Rigidez ao cisalhamento “*through-the-thickness*” (“através da espessura”), obtidos de acordo com as prescrições da norma ASTM D-2719 (1994) – *Standard Test Methods for Structural Panels in Shear Through-the-Thickness*. Segundo BODIG e JAYNE (1993), este método de ensaio foi concebido de modo a submeter o corpo-de-prova a um estado puro de tensões de cisalhamento no plano da chapa.

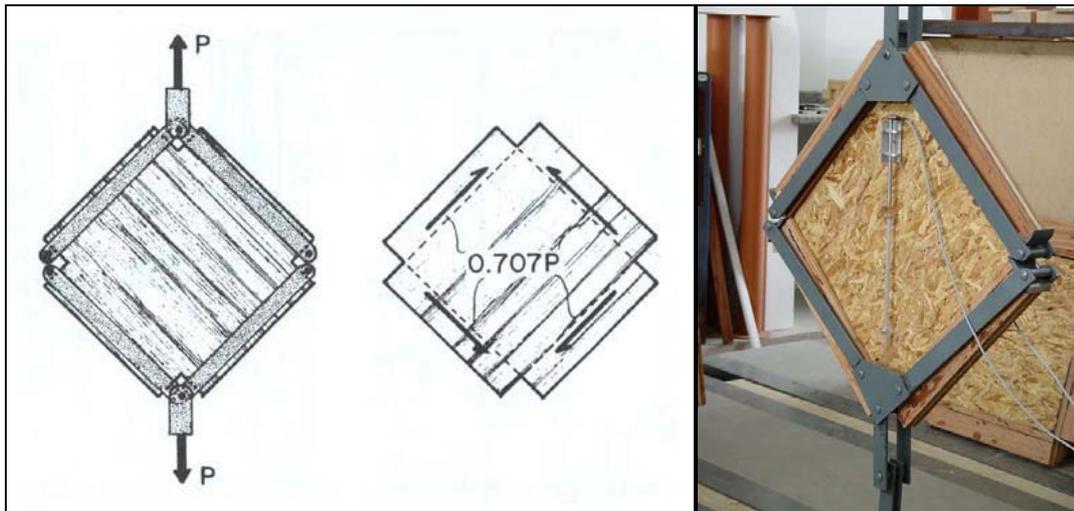


Figura 41 - Ensaio de cisalhamento da chapa de OSB.

A Tabela 6 apresenta os valores médios, desvio-padrão, coeficiente de variação, bem como os valores máximo e mínimo das propriedades da chapa de OSB.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das chapas de OSB – *Oriented Strand Board*.

| Propriedade                                   |                   | Valor Médio | Desvio-padrão | Coeficiente de Variação | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|-----------------------------------------------|-------------------|-------------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Flexão Longitudinal                           | Resistência (MPa) | 22,9        | 1,1           | 4,7%                    | 21,5         | 25,0         |
|                                               | Rigidez (MPa)     | 5463        | 353           | 6,5%                    | 4993         | 6060         |
| Flexão Transversal                            | Resistência (MPa) | 15,6        | 1,0           | 6,2%                    | 14,5         | 17,2         |
|                                               | Rigidez (MPa)     | 2434        | 179           | 7,4%                    | 2209         | 2722         |
| Flexão Vertical                               | Resistência (MPa) | 18,4        | 2,6           | 14,1%                   | 14,1         | 20,8         |
|                                               | Rigidez (MPa)     | 4471        | 266           | 6,0%                    | 4185         | 4868         |
| Cisalhamento “ <i>through-the-thickness</i> ” | Rigidez (MPa)     | 1730 *      | 82,3          | 4,8%                    | 1568         | 1826         |

\* A força última para determinação da tensão de resistência ao cisalhamento “*through-the-thickness*” não pôde ser obtida, em virtude de limitação da capacidade de força do macaco hidráulico disponível para a realização do ensaio.

### 4.1.3 Ensaio das Ligações Pregadas

Sabe-se atualmente que o comportamento dos conectores metálicos (pregos) na ligação entre a chapa de fechamento e a madeira da ossatura é determinante na resposta das paredes em madeira frente às forças laterais monotônicas e cíclicas (HEINE, 1997).

Quando a parede lateral distorce devido à ação de uma força atuando no seu próprio plano, a transmissão dos esforços incidentes na ossatura em madeira para as chapas de fechamento é feita através dos diversos pregos espalhados ao longo das arestas e também na região interna das chapas. Esta ligação é solicitada lateralmente e deve ser capaz de resistir aos esforços atuantes.

A etapa de ensaio das ligações visou determinar as propriedades de desempenho das ligações e, ao mesmo tempo, comparar o comportamento de dois pregos diferentes, tanto com cravação por martelo quanto com cravação por meio de pregadeira pneumática, a qual agiliza de modo considerável a execução dos elementos de piso e parede.

#### 4.1.3.1 Norma de Ensaio

Os ensaios foram feitos com base no método de ensaio da norma ASTM D 1761 (2000) – *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood*, que fornece os procedimentos para a determinação da resistência e rigidez a esforço lateral de um corpo-de-prova representativo da ligação.

O dispositivo de ensaio, confeccionado especialmente para este ensaio, é baseado no modelo apresentado na norma ASTM D-1761 (2000) e reproduzido na Figura 43 – Este dispositivo, acoplado a uma máquina universal de ensaio, permite que uma força lateral seja aplicada ao corpo-de-prova, formado pela união de uma amostra de madeira à chapa de fechamento, através de um único conector metálico (prego).

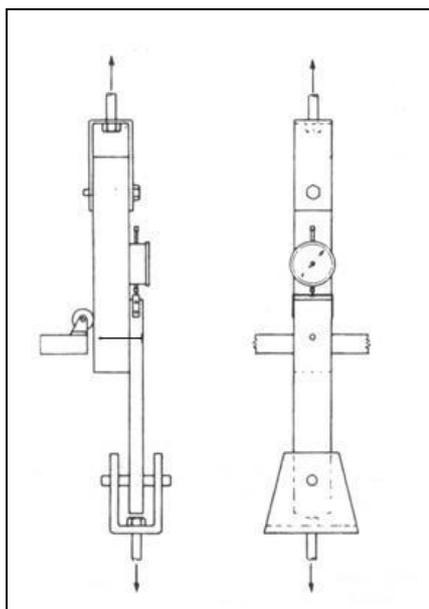


Figura 42 - Dispositivo de ensaio das ligações sugerido pela norma ASTM D-1761 (2000).

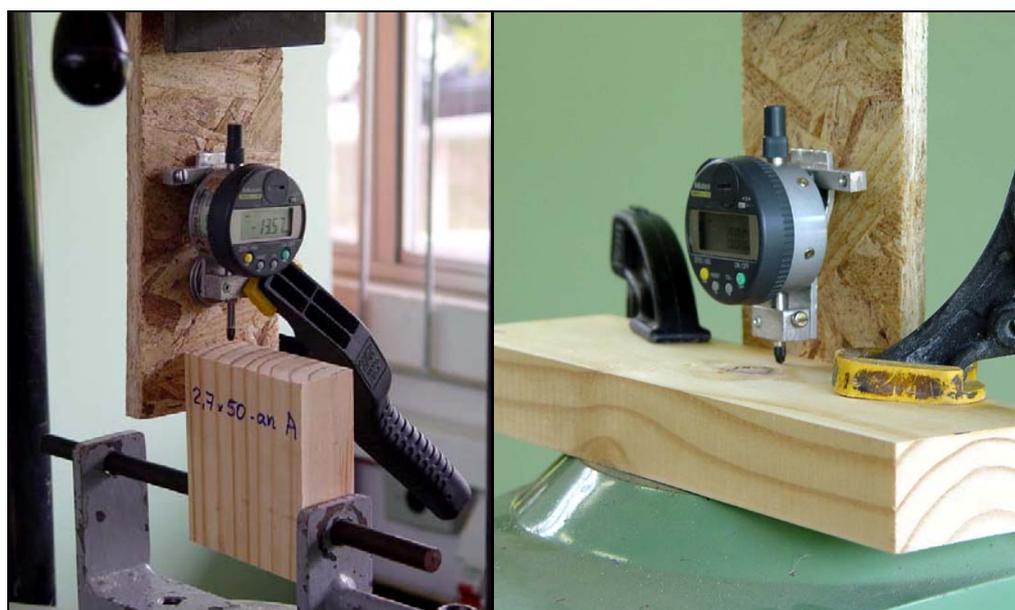


Figura 43 –Ensaio das ligações (direções paralela e perpendicular às fibras da madeira)

A velocidade de ensaio deve ser de  $0,10 \text{ in. (2,54mm)/min} \pm 25\%$  (referenciada à separação dos pratos da Máquina Universal de Ensaio). São registrados os valores simultâneos do deslocamento diferencial entre madeira e chapa, e a correspondente força para a obtenção do diagrama força-deslocamento. Deve ser registrada também a força máxima alcançada.

A norma ASTM D-1761 (2000) não especifica o tamanho da amostra, ressaltando que o número de corpos-de-prova depende do objetivo específico de cada pesquisa, sugerindo, entretanto, a realização de pelo menos cinco repetições para cada série.

#### 4.1.3.2 Definição dos Parâmetros de Desempenho da Ligação

A norma EN 26891 (1991) – *Timber Structures – Joints Made with Mechanical Fasteners* – fornece a definição de algumas características de desempenho das ligações, obtidas a partir do diagrama força-deslocamento. Para expressar estas características de desempenho, serão adotados os seguintes parâmetros:

- Resistência da ligação, dada pela força máxima alcançada ( $F_{\text{máx}}$ );
- Rigidez inicial, dada pela inclinação do trecho inicial do diagrama força-deslocamento entre a origem e o ponto correspondente a 40 por cento da força máxima alcançada ( $0,4F_{\text{máx}}$ );

#### 4.1.3.3 Definição dos Materiais e Medidas

Na etapa de ensaio lateral das ligações, busca-se representar de modo fiel a ligação pregada típica entre a madeira da ossatura e a chapa de fechamento numa parede lateral de sistema leve em madeira (Sistema Plataforma). Deste modo, as amostras representativas dos elementos da ossatura e da chapa de fechamento têm medidas equivalentes àquelas mais comumente empregadas em edificações comuns. A seguir são definidos estes e outros parâmetros referentes à etapa de ensaio das ligações.

#### 4.1.3.4 Amostras das Peças de Madeira da Ossatura

As amostras de madeira foram retiradas do lote de madeiras de *Pinus spp* doado para a pesquisa. Este lote é composto por barrotes com 2,60 metros de comprimento e seção transversal de 38mm x 89mm, que corresponde à seção nominal 2” x 4” normalmente utilizada na América do Norte. A madeira empregada e a seção transversal constituem um parâmetro fixo adotado em todas as etapas da pesquisa.

#### 4.1.3.5 Amostras da Chapa de Fechamento

Embora a espessura das chapas de fechamento de paredes de sistemas leves em madeira seja definida em função da magnitude das forças laterais, esta espessura varia normalmente, segundo SÁNCHEZ (1995), entre 10mm e 18mm, para distâncias comuns entre montantes (400mm a 600mm). Baseado nesta indicação, adotou-se a espessura de 12mm para as chapas de fechamento empregadas nesta pesquisa, por se tratar da medida mais comumente empregada em países com maior tradição na construção de edificações leves em madeira, sendo também uma medida facilmente encontrada no mercado brasileiro.

#### 4.1.3.6 Tipo e Tamanho dos Pregos

Foram adotados dois diferentes tipos de pregos para compor os corpos-de-prova para o ensaio de ligações, com o intuito de observar possíveis diferenças de comportamento, permitindo uma avaliação comparativa entre as diferentes configurações.

A especificação do diâmetro e do comprimento dos pregos utilizados nesta etapa teve como referência citações contidas em literatura estrangeira, principalmente da América do Norte, a respeito das bitolas mais comumente utilizadas em paredes de sistemas leves em madeira.

De acordo com JONES (1995) e THALLON (2000), para uma chapa de fechamento convencional, podem ser tomadas as seguintes relações entre a espessura da chapa e o diâmetro dos pregos:

- Chapas com espessura  $t \leq 1/2\text{in.} (\approx 12,5\text{mm}) \rightarrow$  pregos 6d ( $\delta = 0.113\text{ in.} \approx 2,8\text{ mm}$ );
- Chapas com espessura  $t > 1/2\text{in.} (\approx 12,5\text{mm}) \rightarrow$  pregos 8d. ( $\delta = 0.131\text{ in.} \approx 3,3\text{ mm}$ ).

A tabela 23-II-I-1 – *Allowable Shear for Wind and Seismic Forces in Pounds per Foot for Wood Structural Panel Shear Walls with Framing of Douglas Fir-Larch or Southern Pine*, contida no UBC – *Uniform Building Code* (1997), prescreve, para chapas convencionais de  $15/32\text{in.} (\approx 12\text{ mm})$  de espessura, pregos 8d ( $\delta = 0.131'' \approx 3,3\text{ mm}$ ) com penetração mínima de  $1\frac{1}{2}\text{in.} (\approx 38\text{ mm})$ . Para pregos 6d ( $\delta = 0.113'' \approx 2,8\text{ mm}$ ), a penetração mínima requerida é de  $1\frac{1}{4}\text{in.} (\approx 32\text{ mm})$ .

GAUZIN-MÜLLER (1990) especifica que o comprimento dos pregos deve ser de 2,5 vezes a espessura da chapa de fechamento, porém com valor mínimo de 30 milímetros.

Tabela 7 - Relação entre comprimento e diâmetro dos pregos (segundo UBC e GAUZIN-MÜLLER)

| Diâmetro do prego                                               | Comprimento (L) segundo o <i>Uniform Building Code</i> (UBC, 1997) | Comprimento (L) segundo GAUZIN-MÜLLER (1990)                                          |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>pregos 6d</b><br>( $\delta = 0.113'' \approx 2,8\text{mm}$ ) | $1\frac{1}{4}'' + t_{\text{chapa}} \approx 32 + 12 = 44\text{mm}$  | $2,5 \times t_{\text{chapa}} = 2,5 \times 12\text{mm} = 30\text{mm} = L_{\text{mín}}$ |
| <b>pregos 8d</b><br>( $\delta = 0.131'' \approx 3,3\text{mm}$ ) | $1\frac{1}{2}'' + t_{\text{chapa}} \approx 38 + 12 = 50\text{mm}$  |                                                                                       |

MOLITERNO (1997), baseando-se na antiga norma brasileira de madeiras (NB-11), recomenda que se tenha as seguintes relações entre medida dos pregos e espessura das peças pregadas:

$L = 3 \cdot b_1$  e  $\delta = \frac{1}{6} \cdot b_1$ , onde “L” é comprimento do prego, “b<sub>1</sub>” a espessura da peça menos

espessa e “δ” o diâmetro do prego (em milímetros). Estas relações foram estabelecidas com o intuito de evitar o fendilhamento da madeira durante a cravação dos pregos, e teve como referencial as madeiras tropicais, de densidades mais elevadas que a madeira de Pinus empregada neste trabalho. Ao se tomar as relações para o caso específico desta pesquisa, tem-se,

para  $b_1 = 12\text{mm}$ :  $L = 3 \cdot 12\text{mm} = 36\text{mm}$  e  $\delta = \frac{1}{6} \cdot 12\text{mm} = 2\text{mm}$ .

Este diâmetro, limitado a 2mm para evitar o fendilhamento da madeira, é bem menor do que os pregos 6d e 8d (2,8mm e 3,3mm) prescritos pelos códigos norte-americanos. Entretanto, deve-se observar que a madeira de Pinus empregada nesta pesquisa possui características físicas e mecânicas mais próximas das coníferas do hemisfério Norte do que das madeiras tropicais brasileiras. Deste modo, optou-se por especificar para o ensaio das ligações pregos nacionais com os diâmetros que mais se aproximassem das medidas do prego 6d ( $\delta = 0.113'' \approx 2,8\text{mm}$ ), com comprimento mínimo de 30mm. Entende-se que, para a espécie de madeira e a espessura de chapa utilizada na pesquisa, os pregos 6d talvez sejam mais adequados do que os pregos 8d.

Outro parâmetro a ser explorado é o comportamento de diferentes tipos de prego. Conforme SEDIBOIS (1997), diversas possibilidades podem ser consideradas para aumentar a capacidade resistente das ligações pregadas. Para reforçar a capacidade resistente ao cisalhamento e ao

arrancamento, a escolha corrente consiste em utilizar pregos especiais anelados ou espiralados. Estes pregos apresentam uma resistência bem maior ao arrancamento e limitam o risco de fendilhamento da madeira. Sendo assim, optou-se por ensaiar tanto os pregos lisos como os pregos anelados encontrados no mercado nacional.

Além de levar em conta as diferenças em termos de tipo e tamanho dos pregos, a etapa de ensaio das ligações incluiu ainda uma avaliação da diferença de comportamento entre os pregos comuns (cravação por martelo) e os pregos cravados por meio de pregadeira pneumática. A Tabela 8 apresenta uma síntese dos pregos utilizados no ensaio das ligações; a escolha das bitolas esteve vinculada à disponibilidade de mercado, nem sempre correspondendo à opção mais próxima da desejada.

Tabela 8 - Pregos testados no ensaio das ligações.

| <b>Prego</b>              | <b>Diâmetro (mm)</b> | <b>Comprimento (mm)</b> | <b>Fabricante</b> | <b>Modo de Cravação</b>                                                               |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>16 x 24 – liso</b>     | 2,7                  | 55,2                    | Gerdau            |  |
| <b>2,7 x 50 – anelado</b> | 2,7                  | 50                      | CIM do Brasil     |  |



Figura 44 - Tipos de pregos usados na pesquisa: anelado e liso.

#### 4.1.3.7 Outras Considerações

##### a) Orientação das Fibras da Madeira

A parede lateral, ao distorcer na forma de um paralelogramo, imprime esforços a cada prego, que será solicitado segundo uma direção em relação às fibras da madeira, dependendo de sua posição na parede e das condições de ancoragem. Segundo SALENIKOVICH (2000), em paredes que não contêm dispositivos de ancoragem junto aos montantes extremos, um modo de falha bastante comum é o rasgamento da chapa pelos pregos situados nas travessas (principalmente a inferior), devido ao pouco espaçamento às bordas, uma vez que o esforço se dá no sentido perpendicular às fibras da madeira da ossatura (ver Figura 45-a). Já nas paredes em que estes dispositivos são empregados, a força exercida pelo prego ocorre predominantemente na direção perpendicular às fibras da madeira, porém o problema do rasgamento da chapa é menos freqüente, devido à melhor ancoragem da parede.

Por outro lado, os pregos situados ao longo dos montantes verticais são solicitados predominantemente segundo a direção paralela aos montantes, ou seja, de modo paralelo às fibras da madeira.

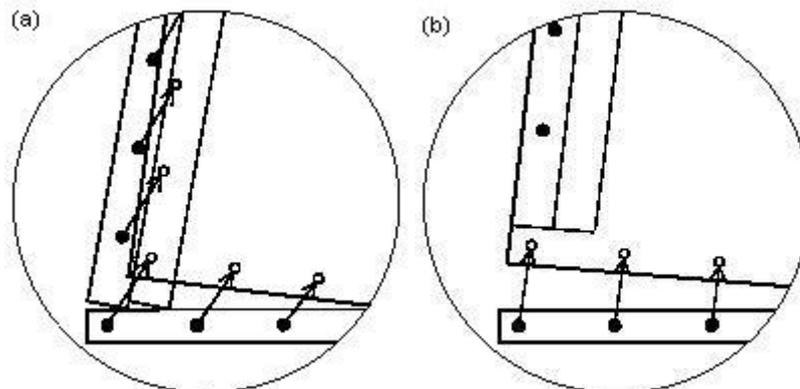


Figura 45 - Rasgamento das chapas na travessa inferior da parede: (a) parede com dispositivo de ancoragem; (b) parede sem dispositivo de ancoragem (extraído de SALENIKOVICH, 2000).

#### b) Distância dos pregos à borda da chapa

O desempenho da ligação pode sofrer uma significativa redução quando a distância às bordas das chapas é muito pequena. GAUZIN-MÜLLER (1990) ressalta que os pregos devem estar situados a pelo menos 10mm das bordas das chapas, para evitar o seu rasgamento ao longo de suas arestas. Este valor é também especificado como distância mínima pela maioria dos códigos de construção norte-americanos.

A distância às bordas da chapa é sempre limitada nas paredes de sistemas leves em madeira, devido à própria configuração das paredes. Nos montantes verticais, ao longo da junção de duas chapas adjacentes, ocorre a situação mais crítica, pois somente a metade da largura do montante estará disponível para cada prego. Nestes casos, a distância às bordas das chapas aproxima-se do valor mínimo de 10mm. Entretanto, como nestes pontos o esforço é predominantemente paralelo aos montantes, esta limitação não compromete a capacidade resistente da ligação.

Nas travessas superior e inferior, que trabalham predominantemente na direção perpendicular às fibras da madeira, a distância dos pregos às bordas da chapa é limitada pela largura das peças que compõem a travessa. Por exemplo, quando se trabalha com peças de seção padrão 2" x 4" (38mm x 89mm), a distância às bordas da chapa fica restringida à metade da largura das peças (19mm).

Assim sendo, no ensaio das ligações os corpos-de-prova reproduzem estas condições estabelecidas, sendo ensaiados nas direções perpendicular e paralela às fibras da madeira. No caso dos corpos-de-prova ensaiados perpendicularmente às fibras da madeira, a distância às bordas é de 19mm, representando a condição relativa às travessas. Nos corpos-de-prova ensaiados paralelamente às fibras da madeira, esta distância foi especificada em 30mm, já que a distância às bordas da chapa não é condição crítica.

#### 4.1.3.8 Configuração dos corpos-de-prova

Foram tomados aleatoriamente seis barrotes de madeira de *Pinus*, sendo denominados de A a F. De cada barrote foram retiradas sete peças para compor os corpos-de-prova referentes aos diferentes pregos testados. Isto significa que os pregos puderam ser cravados em peças idênticas

de madeira, possibilitando uma melhor avaliação comparativa. A Tabela 9 apresenta a densidade aparente da madeira dos barros.

Tabela 9 - Relação da densidade aparente da madeira empregada no ensaio das ligações.

| <b>Densidade Aparente da Madeira de Pinus</b> |          |          |          |          |          |          |              |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| <b>Barrote</b>                                | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> | <b>Média</b> |
| <b>Densidade (kgf/m<sup>3</sup>)</b>          | 429      | 451      | 394      | 446      | 414      | 500      | <b>439</b>   |

Os corpos-de-prova para o ensaio das ligações, tanto para a direção paralela (PL) bem como à direção perpendicular (PP) às fibras da madeira, estão ilustrados na Figura 46, contendo as dimensões das peças e a distância do prego às bordas da peça de madeira e da chapa de fechamento.

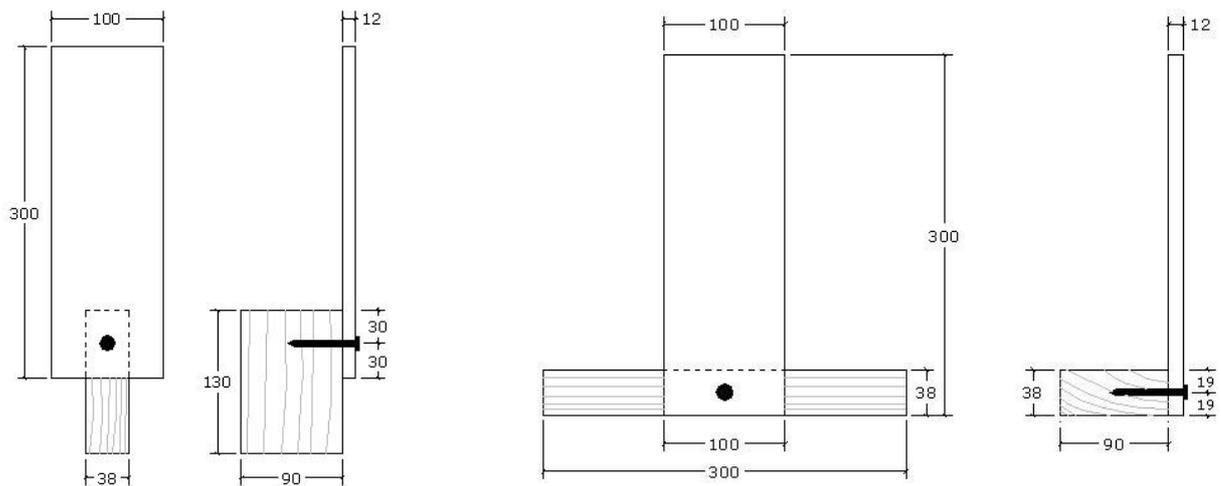


Figura 46 - Configuração dos corpos-de-prova para ensaio das ligações: direção paralela às fibras da madeira (à esquerda) e perpendicular às fibras da madeira (à direita)

#### 4.1.3.9 Resultado do Ensaio das Ligações

A diferença de comportamento das ligações quando a solicitação é paralela ou perpendicular às fibras da madeira foi pequena para os dois pregos testados. A Figura 48 e a Figura 49 mostram as curvas médias (força-deslocamento) referentes aos seis barros de madeira, tanto para as direções paralela e perpendicular, bem como a curva média geral.

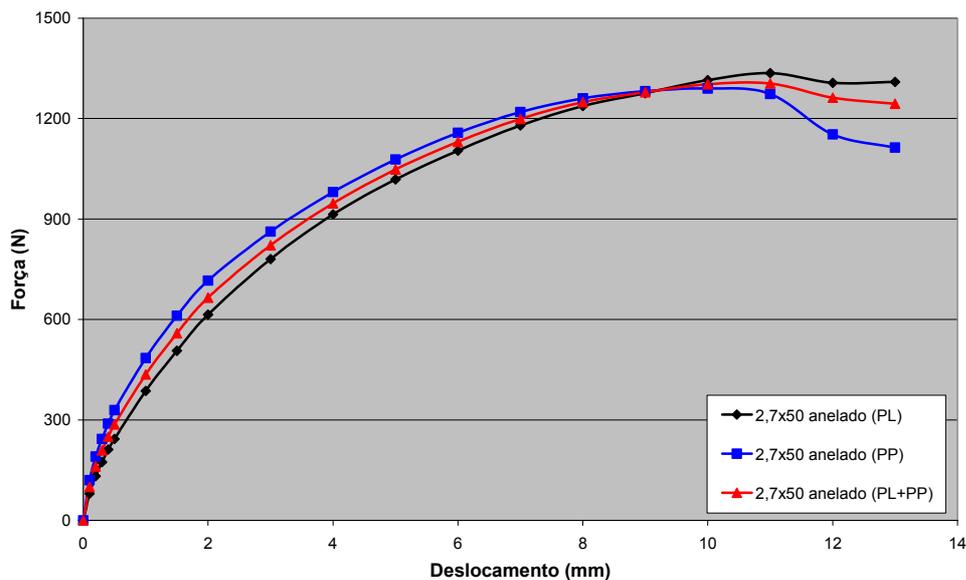


Figura 47 – Curvas médias força-deslocamento do ensaio das ligações para o prego 2,7 x 50 anelado.

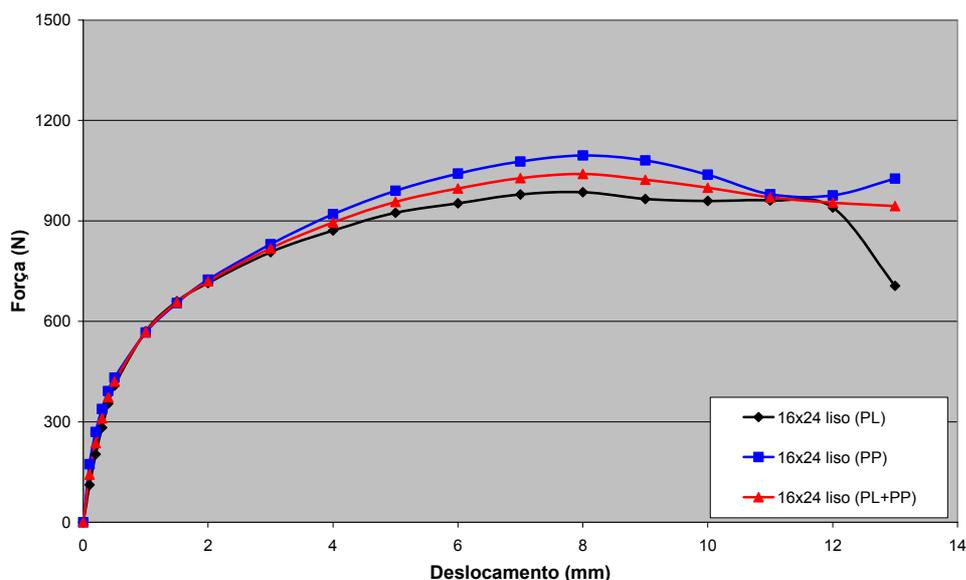


Figura 48 - Curvas médias força-deslocamento do ensaio das ligações para o prego 16 x 24 liso.

Pode-se observar, no ensaio das ligações, que cada prego apresenta um trecho inicial aproximadamente linear e rígido e, em seguida, começa a perder rigidez devido à flexão do pino e/ou ao embutimento da madeira, definindo o escoamento da ligação. A variabilidade de resultados se mostrou num patamar normal e aceitável para a madeira.

A Figura 49 mostra a curva média geral para os pregos 2,7x50-anelado e 16x24-liso, evidenciando a diferença de comportamento entre os dois pregos testados. O prego 2,7x50-

anelado apresenta maior valor de força máxima resistente, ao passo que o prego 16x24-liso apresenta maior rigidez do trecho inicial.

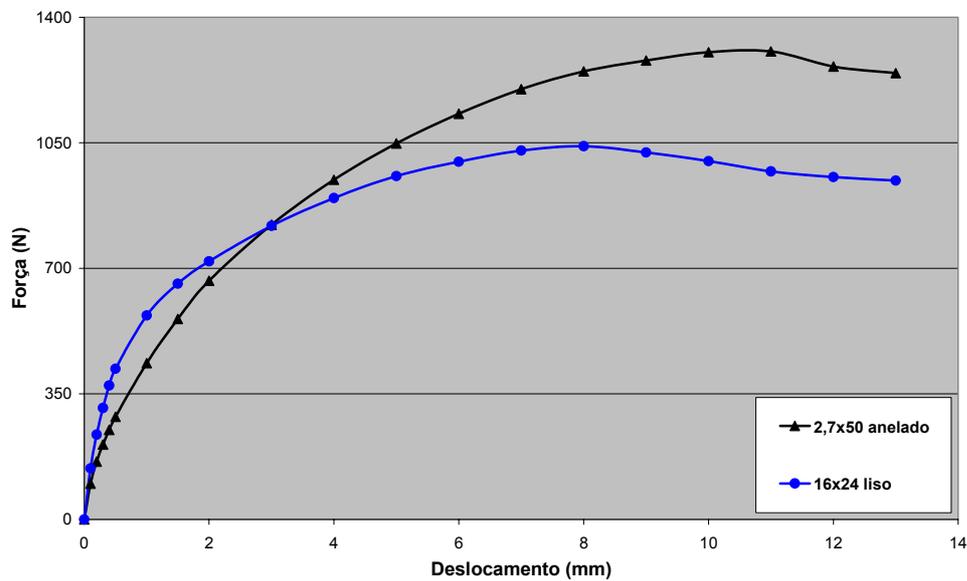


Figura 49 – Curva média do ensaio das ligações para os pregos 2,7x50-anelado e 16x24-liso.

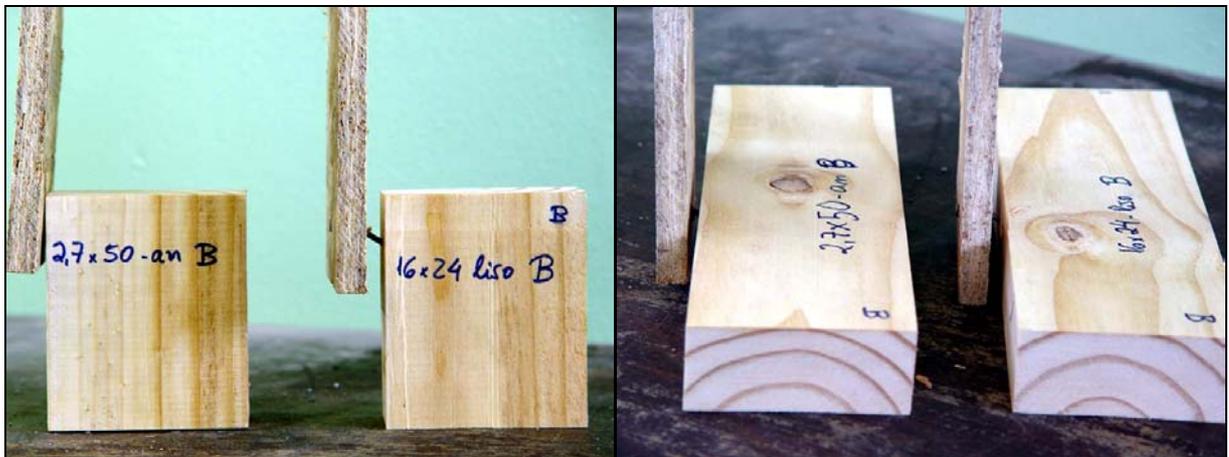


Figura 50 – Corpos-de-prova após ensaio de força lateral da ligação pregada.

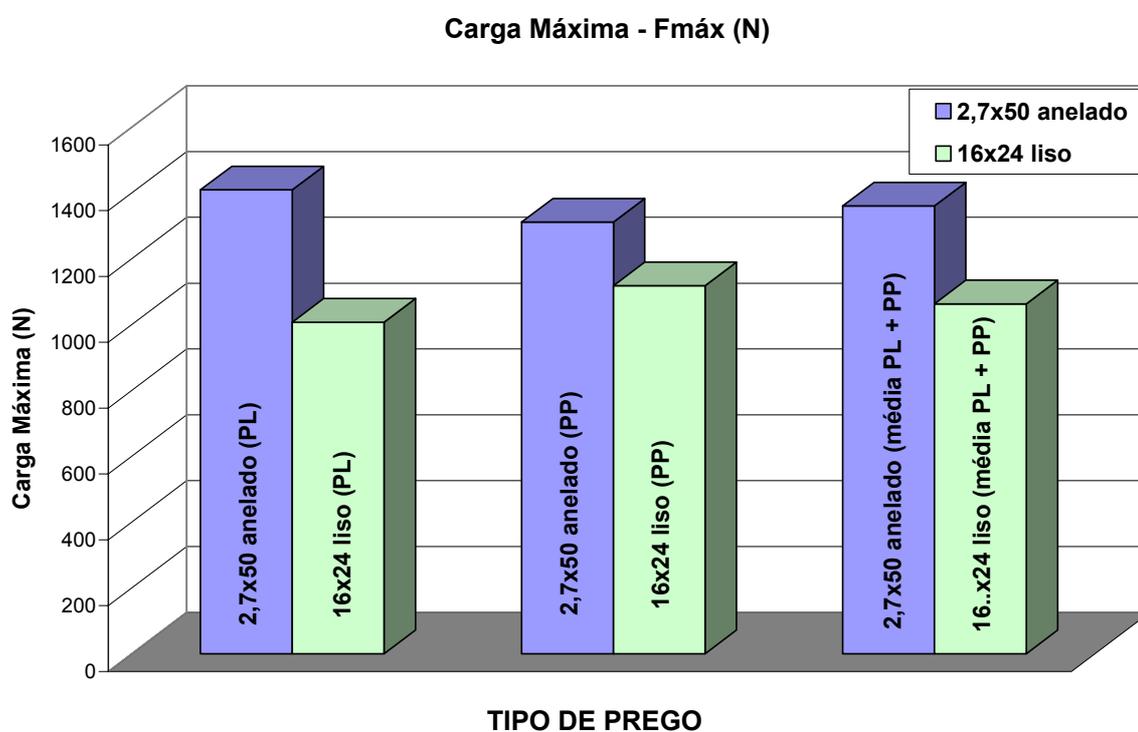
A Tabela 10 apresenta os valores das propriedades de desempenho das ligações pregadas para todos os tipos e tamanhos de prego ensaiados.

Tabela 10 - Resumo das propriedades de desempenho das ligações.

| PREGO                   | $F_{m\acute{a}x}$<br>(N) | $0,4 * F_{m\acute{a}x}$<br>(N) | $\delta_{0,4 * F_{m\acute{a}x}}$<br>(mm) | $K_i$<br>(N/mm) |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| <b>2,7 x 50 anelado</b> | 1360                     | 544                            | 1,44                                     | 378             |
| <b>16 x 24 liso</b>     | 1063                     | 425                            | 0,52                                     | 822             |

Os valores expressos na Tabela 10 refletem de fato aquilo que é mostrado no diagrama força-deslocamento, isto é, o prego 2,7x50-anelado apresenta força máxima cerca de 28% maior do que a do prego 16x24-liso. Por outro lado, a rigidez do trecho inicial do diagrama é maior para o prego 16x24-liso. A Tabela 11 mostra a variação da força máxima segundo as duas direções de orientação das fibras da madeira (paralela e perpendicular), para os dois pregos testados.

Tabela 11 – Variação da força máxima da ligação segundo as direções paralela e perpendicular.



## 4.2 ENSAIO DOS PROTÓTIPOS DE PAREDE

Esta etapa da pesquisa visou submeter a ensaio protótipos de parede, em tamanho real, representativos de paredes de sistemas leves em madeira, para obtenção dos parâmetros de desempenho quando submetidos a carregamento lateral monotônico.

Embora pesquisas recentes na América do Norte têm dado ênfase atualmente a ensaios cíclicos, que simulam a ação de solicitações sísmicas ou de furacões, estes tipos de intempérie não ocorrem no Brasil, sendo portanto adequados e suficientes os ensaios monotônicos que, segundo SALENIKOVICH (2000), continuam sendo um meio importante de avaliar a resistência e rigidez de paredes submetidas a forças laterais de vento.

No Brasil, VELOSO (2003) realizou um trabalho experimental envolvendo paredes de sistema leve em madeira submetidas a carregamento lateral, no qual foram ensaiadas paredes com ossatura feita de Jatobá e fechamento em compensado de 12,5mm de espessura. As paredes foram ensaiadas segundo as prescrições da norma ASTM E-72 (1998), estudando-se a variação da densidade de pregos e confrontando os resultados com os da modelagem segundo o Método dos Elementos Finitos. Posteriormente, SILVA (2004), baseando-se nos resultados experimentais de VELOSO (2003), aprimorou a modelagem das paredes, utilizando elementos sólidos em vez de elementos de barra.

### 4.2.1 Norma de Ensaio

As normas ASTM E-72 (1998) – Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction – e ASTM E-564 (1995) – *Standard Practice for Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings* – fornecem métodos e procedimentos de ensaio para paredes de madeira sob força lateral. Entretanto, conforme SHERWOOD e MOODY (1989), a norma E-564 consegue avaliar o desempenho das paredes estruturais em condições reais de uso, permitindo estudar parâmetros tais como o modo de fixação e ancoragem das paredes. A norma E-72, por outro lado, prevê um dispositivo externo de fixação que prende completamente a parede, impedindo seu giro, permitindo a avaliação e comparação do desempenho de diferentes chapas de fechamento fixados a uma ossatura de madeira.

GRIFFITHS apud JOHNSON (1997) considera a norma ASTM E-72 inadequada para ensaios de paredes estruturais, pois restringe de modo exagerado os protótipos, levando a modos de ruptura pouco realistas.

Assim sendo, foi adotada a norma E-564 para a execução da etapa de ensaio das paredes estruturais. De modo geral, o ensaio baseia-se na aplicação de uma força no plano da parede, ao longo de sua travessa superior. A parede deve estar devidamente fixada junto à base de apoio e os deslocamentos do protótipo devem estar restringidos ao próprio plano da parede; para isto, devem ser previstos dispositivos que impeçam o deslocamento das travessas fora de seu plano. O esquema reproduz de modo adequado as condições reais de fixação da parede e de transmissão das forças. Os protótipos foram ensaiados na posição horizontal, em função das condições operacionais do laboratório. De acordo com a norma ASTM E-564, o ensaio pode ser feito tanto com o protótipo na posição vertical como na posição horizontal, não havendo a rigor diferença nos resultados.

A norma E-564 sugere a realização de duas repetições para cada variável estudada, devendo ser testado um terceiro exemplar caso a diferença entre os dois protótipos testados seja maior que 15% em termos de resistência e rigidez.

#### **4.2.2 Dispositivos de Ensaio**

Foram confeccionados dispositivos metálicos especiais para possibilitar a reprodução do ensaio. Nestes, um perfil I metálico, preso a uma estrutura rígida, permite a fixação das paredes através de parafusos, simulando os parafusos de fixação presentes no concreto da fundação. No lado oposto, a parte superior da parede fica apoiada em roletes que permitem a movimentação da parede em seu próprio plano e impedem o movimento fora de seu plano. A parede é solicitada por carregamento monotônico através de um macaco hidráulico, que imprime força a um perfil metálico que, através de parafusos, distribui o carregamento ao longo da dupla travessa superior da parede. A Figura 51 ilustra o dispositivo de ensaio.

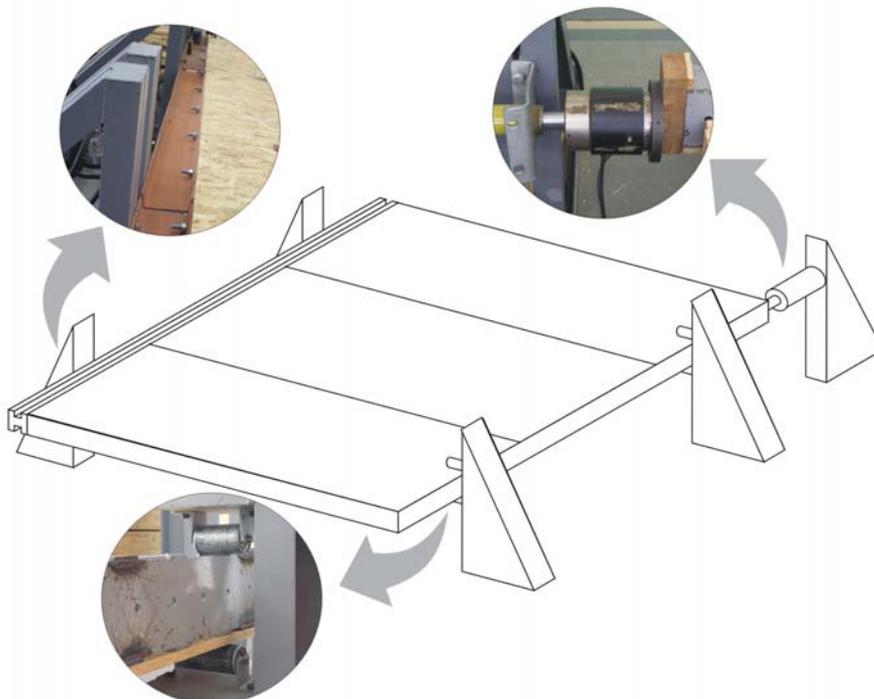


Figura 51 – Dispositivo de ensaio das paredes.

#### 4.2.2.1 Procedimentos de Ensaio

Uma síntese dos procedimentos de carga e descarga estabelecidos pela norma ASTM E-564 está relacionada a seguir:

- Aplicar uma pré-carga de aproximadamente 10% da força última estimada e mantê-la por cinco minutos, para assentar todo o conjunto. Remover a força, aguardar cinco minutos e fazer a leitura inicial de todos os dispositivos de medição dos deslocamentos;
- Para cada incremento de força, manter a aplicação da força por um minuto, antes de efetuar a leitura da força e dos deslocamentos;
- Nos patamares de força de aproximadamente um terço e dois terços da força última estimada, remover a força e registrar a recuperação da parede após cinco minutos. Reaplicar força para o próximo incremento, seguindo desta forma até ultrapassar a força última.

#### 4.2.2.2 Instrumentação

Para a obtenção das propriedades de resistência e rigidez de uma parede, as forças aplicadas e as correspondentes deformações devem ser registradas, como preconiza a norma E-564. O registro das informações colhidas nos ensaios foi feito através do sistema de aquisição de dados Spider 8, da HBM, gerenciado pelo software Catman 4.5. A este sistema foram conectados os diversos transdutores indutivos para o monitoramento dos deslocamentos da parede, além da célula de força, com capacidade para toneladas (presa ao macaco hidráulico).

Os deslocamentos da parede foram medidos em quatro pontos (ver Figura 52). Cada transdutor tem uma função definida. O transdutor 1 permite a leitura do deslocamento no topo da parede; o transdutor 2 foi colocado junto à travessa inferior, para verificar possíveis deslocamentos decorrentes do deslizamento da parede à base; o transdutor 3 permite observar a desprendimento do montante extremo tracionado; e o transdutor 4 verifica se há algum deslocamento vertical do montante extremo comprimido.

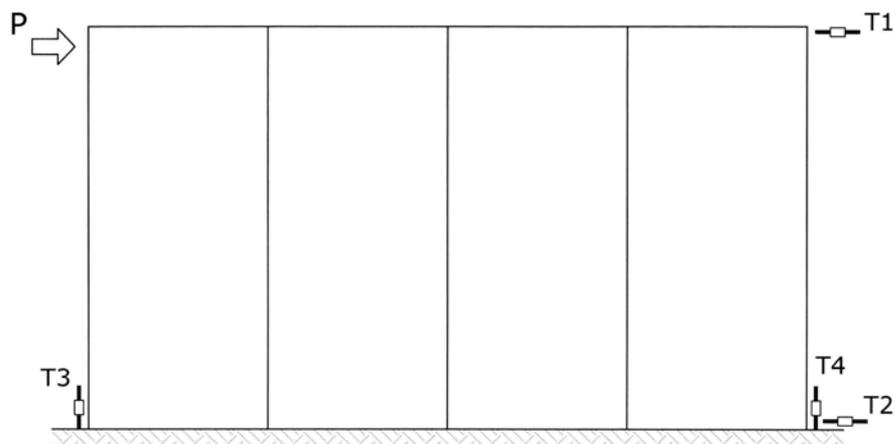


Figura 52 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento: T1: deslocamento de topo; T2: deslocamento da base; T3: deslocamento do montante tracionado; T4: deslocamento do montante comprimido..

### 4.2.3 Definição dos Parâmetros de Desempenho das Paredes Estruturais

Para a determinação dos parâmetros de desempenho das paredes ensaiadas, serão definidas as seguintes propriedades:

- **Resistência Máxima da Parede ( $S_u$ ):** a norma ASTM E-564 define este parâmetro como sendo a força máxima alcançada dividida pelo comprimento da parede, de modo a se expressar o resultado em função da força por comprimento. Assim sendo:  $S_u = \frac{F_{máx}}{L}$ ,

onde:

$F_{máx}$  é a força máxima alcançada, em N;

$L$  é o comprimento da parede, em mm.

- **Rigidez Linear da Parede ( $G'$ ):** a norma ASTM E-564 define este parâmetro como sendo a rigidez referente ao trecho inicial do diagrama força-deslocamento da parede, entre o ponto de origem e o ponto limite de escoamento. É dada por:  $G' = \frac{F_{esc}}{\Delta_{esc}} \cdot \frac{H}{L}$

onde:

$F_{esc}$  é a força correspondente ao ponto limite de escoamento, em N;

$\Delta_{esc}$  é o deslocamento correspondente ao ponto limite de escoamento, em mm;

$H$  e  $L$  são a altura e o comprimento da parede, respectivamente.

Devido à característica típica de não-linearidade das paredes estruturais, o ponto limite de escoamento é dado por um valor convencional, pois não existe um patamar de escoamento claro e bem definido, ao contrário do que acontece, por exemplo, no ensaio à tração de uma barra de

aço. A norma ASTM E-564 não fixa um valor para o ponto limite de escoamento, somente salienta que deve ser selecionado um ponto que leve a um valor aceitável, sugerindo o ponto correspondente a  $0,33.F_{m\acute{a}x}$ .

Já HE et al (1997) definiram o ponto limite de escoamento como sendo o correspondente a 50 por cento da força máxima alcançada ( $0,5.F_{m\acute{a}x}$ ). Por outro lado, HEINE (1997) e SALENIKOVICH (2000) adotaram o ponto limite de escoamento correspondente a 40 por cento da força máxima ( $0,4.F_{m\acute{a}x}$ ).

Como não existe uma medida consensual, neste trabalho utilizar-se-á para o cálculo da rigidez linear da parede o ponto de escoamento correspondente a 40 por cento da força máxima, visto que este ponto equivale ao definido pela norma EN 26891 (1991) para a rigidez inicial da ligação pregada. Assim sendo, temos:

$$F_{esc} = 0,4.F_{m\acute{a}x}$$

$$\Delta_{esc} = \Delta_{0,4.F_{m\acute{a}x}}$$

#### 4.2.4 Especificação de Materiais e Medidas

Em ensaios de protótipos de parede em tamanho real, as dificuldades intrínsecas à sua realização e o número elevado de parâmetros que exercem influência sobre o desempenho destes elementos torna fundamental o estudo apenas dos parâmetros mais relevantes em termos dos objetivos propostos, restringindo-se as variáveis consideradas. Assim sendo, foi incorporado um universo reduzido porém representativo de parâmetros estudados. A Tabela 12 relaciona os parâmetros comuns a todos os protótipos ensaiados.

Tabela 12 - Resumo dos Parâmetros Fixos especificados para os ensaios das paredes

| <b>Parâmetro</b>                                                                | <b>Especificação</b>                                              | <b>Observações</b>                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Espécie de madeira                                                              | <i>Pinus spp</i>                                                  |                                                             |
| Seção transversal das peças de madeira                                          | 38 mm x 89 mm                                                     | padrão 2" x 4"<br>(América do Norte)                        |
| Espaçamento entre montantes                                                     | 406 mm                                                            |                                                             |
| Tipo de chapa de fechamento                                                     | OSB Masisa                                                        |                                                             |
| Espessura da chapa de fechamento                                                | 12 mm                                                             |                                                             |
| Espaçamento dos pregos                                                          | 150 mm – pregação periférica<br>300 mm – pregação interna         |                                                             |
| Altura das paredes*                                                             | 2760 mm                                                           |                                                             |
| Prego para montagem da ossatura (ligação dos montantes às travessas) **         | 2 pregos 19 x 39<br>( $\delta \approx 3,9$ mm; L $\approx 89$ mm) | Equivale ao prego 6d<br><br>(América do Norte)              |
| Pregos para união entre peças dos montantes duplos e da dupla travessa superior | 1 prego 2,7 x 70 (anelado) a cada 40 cm (em ziguezague)           | 2 pregos nas extremidades das peças (inclusive nas emendas) |
| Parafusos de fixação à base                                                     | Parafusos com diâmetro de 5/8" ( $\varnothing = 15,8$ mm)         | 1 parafuso a cada 406 mm                                    |

\* A maioria dos ensaios de parede encontrados na literatura são feitos em protótipos com altura de 2440mm, equivalente à medida padrão das chapas de madeira reconstituída. Esta medida representa um pé-direito aquém do usualmente adotado nas edificações brasileiras. Assim sendo, incorporou-se às paredes uma medida complementar de 320mm, perfazendo o pé-direito de 2760mm.

\*\* O prego comum 19 x 39 possui medidas próximas às do prego 16d especificados nos códigos norte-americanos.

A Figura 53 mostra a composição de um protótipo de parede com aberturas de porta e janela, onde se pode observar os montantes extremos duplos, as travessas duplas (inferior e superior), os elementos bloqueadores próximos à parte superior da parede, bem como as vergas, umbrais e contravergas.

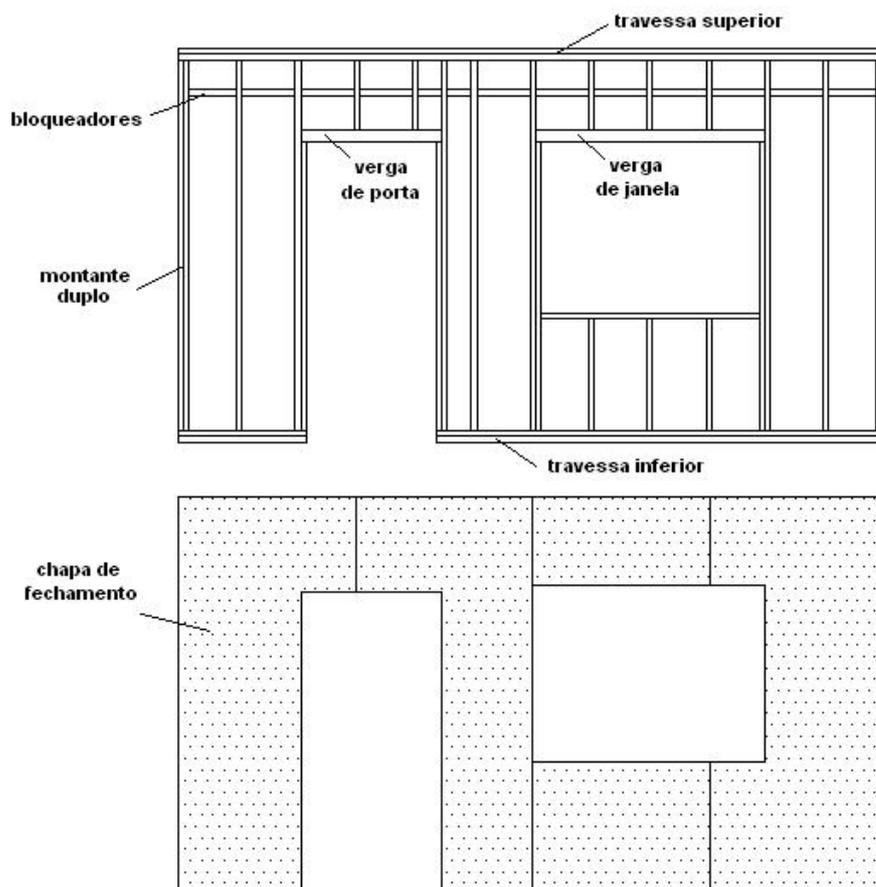


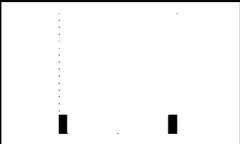
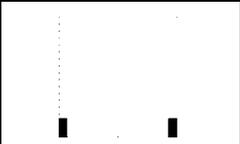
Figura 53 – Configuração básica de um dos protótipos de parede, mostrando a ossatura em madeira e a disposição das chapas.

#### 4.2.5 Configuração dos Protótipos de Parede

A etapa de ensaio das paredes estruturais foi dividida numa série de ensaios concebidos para uma avaliação de diferentes parâmetros de desempenho, conforme proposto nos objetivos da pesquisa. Para cada parâmetro estudado, foram confeccionadas e ensaiadas duas repetições, não cabendo neste caso nenhuma análise estatística dos dados. Entretanto, os resultados fornecem um bom indicativo do desempenho das paredes.

A seguir estão relacionadas as diferentes configurações de protótipos de parede que fazem parte da etapa experimental de ensaios, cujos resultados e discussões são apresentados no capítulo seguinte. Os ensaios permitiram o estudo de diferentes parâmetros, possibilitando avaliações comparativas entre o desempenho de paredes quando se varia o tipo de prego, o comprimento das paredes, a taxa de aberturas e as condições de ancoragem e fixação à base.

Tabela 13 - Configuração dos protótipos de parede

| PROTÓTIPO      | CONFIGURAÇÃO                                                                        | ABERTURAS                                          | TAXA DE ABERTURAS | FIXAÇÃO              | ANCORAGEM |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------|
| P244-pregoliso |    | Nenhuma                                            | 1,0               | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P244           |    | Nenhuma                                            | 1,0               | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P366           |   | Nenhuma                                            | 1,0               | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P488           |  | Nenhuma                                            | 1,0               | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P488-1P1J      |  | 1 porta<br>900x2100mm e<br>1 janela<br>1518x1200mm | 0,646             | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P488-2J        |  | 2 janelas<br>1600x1500mm                           | 0,491             | Parafuso 5/8"        | Sim       |
| P488-pf        |  | Nenhuma                                            | 1,0               | Parafuso 5/8"        | Não       |
| P488-2J-pf     |  | 2 janelas<br>1600x1500mm                           | 0,491             | Parafuso 5/8"        | Não       |
| P488-pg        |  | Nenhuma                                            | 1                 | Pregos 19x36<br>liso | Não       |

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo traz os resultados dos ensaios dos protótipos de parede em tamanho real. Os protótipos foram ensaiados num dispositivo especial montado sobre a laje de reação do Laboratório de Experimentação em Estruturas, do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, no período de Março a Setembro de 2004.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

#### 5.1.1 Ancoragem das Paredes

Para possibilitar a ancoragem dos montantes extremos dos protótipos com ancoragem plena, foi confeccionada uma cantoneira metálica, com abertura inferior para passagem do parafuso de fixação à base ( $\phi = 5/8''$ ) e duas linhas de furos laterais para fixação dos pregos ao montante vertical extremo.

A quantidade de pregos foi definida com base nos resultados de ensaio de força lateral da ligação formada por um único prego 19x36 liso, cravação por martelo, unindo uma amostra dos montantes duplos a uma chapa de aço de mesma espessura que a empregada na confecção dos dispositivos de ancoragem. Foram ensaiados 12 corpos-de-prova, cuja concepção foi baseada no prescrito pela norma ASTM D-1761 (2000).

Tabela 14 –Ensaio de força lateral numa amostra da ligação pregada do dispositivo de ancoragem

| <b>Prego 19x36 liso</b> | <b>Valor médio</b> | <b>Desvio-padrão</b> | <b>C.V.</b> |
|-------------------------|--------------------|----------------------|-------------|
| <b>Carga máxima (N)</b> | 2273               | 316                  | 12,3%       |

A força de tração no montante extremo é calculada em função da força atuando no topo da parede, que causa um momento de giro da parede, que é combatido pelo binário formado pelos montantes extremos, no caso das paredes ancoradas. Com base na força máxima estimada para a parede com 2,44 metros de comprimento (contida no anexo I) e na capacidade resistente da ligação pregada, definiu-se a quantidade de dez pregos 19x36 (tipo liso) para prender o dispositivo de ancoragem ao montante extremo tracionado. Esta quantidade foi mantida para todas as paredes ancoradas.



Figura 54 - Ensaio da ligação pregada para definição da quantidade de pregos no dispositivo de ancoragem. (a) Vista co corpo-de-prova da ligação; (b) Dispositivo de ancoragem preso ao montante extremo.

Em seguida foi feito um ensaio do dispositivo de ancoragem fixado ao duplo montante, através de dez pregos 19 x 36 (tipo liso). Este ensaio foi realizado em compressão (por questões operacionais), estando o esquema de ensaio e o diagrama força-deslocamento mostrados na Figura 55 .

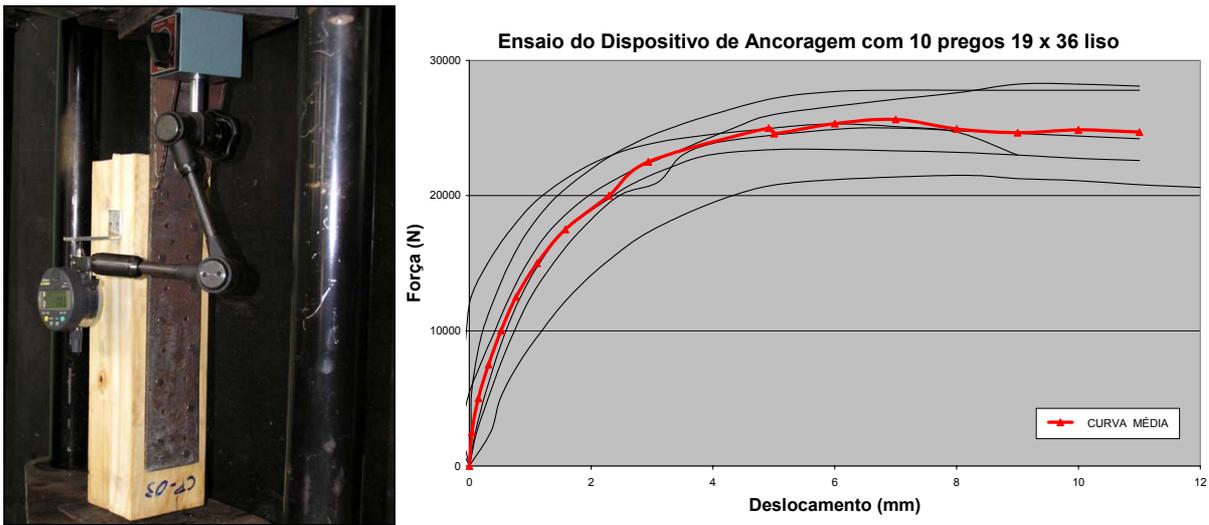


Figura 55 - Ensaio do dispositivo de ancoragem preso a montante duplo através de dez pregos 19x36 liso.

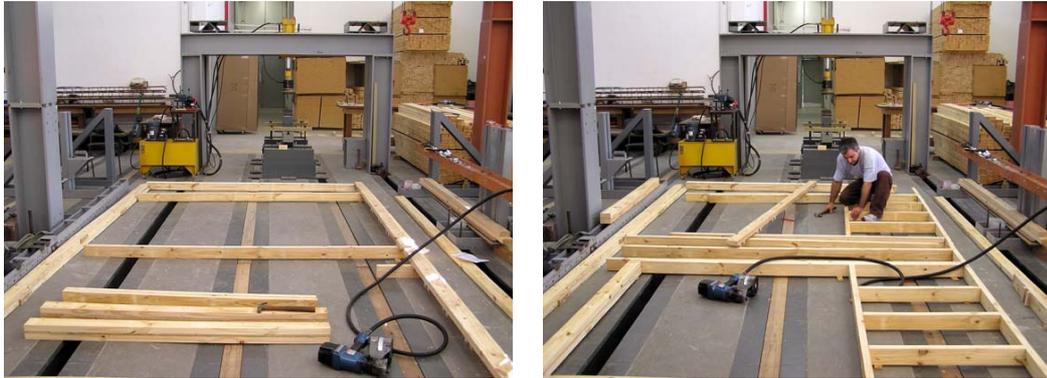
### 5.1.2 Estimativa da Força Máxima

A estimativa da força máxima foi feita com base nos métodos apresentados no capítulo 3, que variam em função das condições de ancoragem e da taxa de aberturas das paredes. Os cálculos da força máxima estimada, segundo estes métodos, estão contidos no anexo I.

### 5.1.3 Seqüência de Montagem

Cada protótipo foi confeccionado num período do dia e ensaiado no dia seguinte. A seqüência de montagem adotada consistia em fabricar a ossatura no chão, unindo os montantes verticais às travessas. Estando a ossatura pronta, um perfil metálico era preso à travessa superior, através de parafusos ao longo da travessa, para propiciar uma distribuição das forças aplicadas na parede. Em seguida, o conjunto era erguido com o auxílio de uma ponte rolante, a travessa inferior era fixada ao perfil rígido da base e a travessa superior era apoiada nos roletes, cuja função era impedir o movimento da parede fora de seu plano. Após estar a parede devidamente posicionada no dispositivo, dava-se início à pregação das chapas de fechamento. Ao final, os transdutores de deslocamento eram posicionados nos pontos de leitura e o macaco hidráulico imprimia a força lateral ao protótipo de parede.

Início de montagem da ossatura em madeira.



Ossatura é levantada e fixada ao dispositivo de ensaio.



Fixação das chapas de OSB.



Figura 56 - Sequência de montagem de um protótipo de parede com duas aberturas de janela.

### 5.1.4 Forma de Realização dos Ensaios e Expressão dos Resultados

Conforme as prescrições da norma ASTM E-564, para cada protótipo foi respeitado o roteiro de carga e descarga da parede, aplicando-se a pré-carga de aproximadamente 10% da força máxima estimada, aliviando-se a força para relaxamento da parede, em seguida aplicando-se os três ciclos de carga e descarga, correspondentes a um terço e dois terços da força máxima estimada e, no terceiro ciclo, a parede era carregada até a força última, correspondendo à perda de força e deslocamentos elevados.

O desempenho de cada parede é expresso pelo diagrama força-deslocamento, em que o deslocamento horizontal da travessa inferior é subtraído do deslocamento medido no topo da parede, para indicar a rigidez aparente da parede, que leva em conta os deslocamentos originados da prática construtiva empregada para a sua confecção, fixação e ancoragem.

Originalmente, o diagrama advindo do ensaio das paredes tem o aspecto mostrado na Figura 57 (à esquerda), onde se pode observar as curvas de descarregamento e recarregamento da parede, em consequência dos procedimentos prescritos pela norma ASTM E-564. Na Figura 57 (à direita), o mesmo diagrama é mostrado, porém omitindo-se as curvas de histerese. Os diagramas força-deslocamento apresentados na seqüência do trabalho serão mostrados sem as curvas de histerese, para melhor visualização do comportamento das paredes.

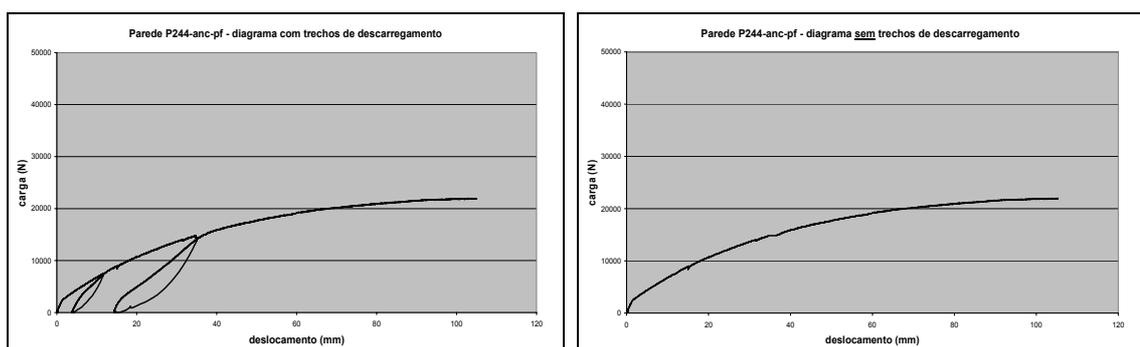


Figura 57 - Diagrama força-deslocamento da parede P244-anc-pf. À esquerda, diagrama com as curvas de descarregamento da estrutura. À direita, as curvas são omitidas, para melhor visualização.

## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

### 5.2.1 Variação do tipo de prego

A primeira investigação foi concebida com o intuito de observar a diferença de comportamento das paredes estruturais ao se variar o tipo de prego utilizado. Para isto, foram confeccionados protótipos de parede com comprimento de 2,44 metros, empregando-se os pregos 2,7 x 50 (tipo anelado), com cravação por pregadeira pneumática, e 16 x 24 (tipo liso), com cravação comum por martelo. Estes protótipos foram denominados P244 e P244-pregoliso, respectivamente.

Os protótipos pertencentes a esta série apresentam as seguintes características comuns: são totalmente fechados (sem aberturas); a fixação da dupla travessa inferior é feita através de 6 parafusos de fixação de 5/8" ( $\varnothing = 15,8\text{mm}$ ), espaçados a cada 406mm, prendendo as duas peças da travessa à base; a ancoragem é plena, isto é, possuem dispositivos metálicos de ancoragem para evitar o desprendimento do montante extremo em relação à base.



Figura 58 - Vista geral do ensaio da parede P244

#### 5.2.1.1 Diagrama força-deslocamento

Na Figura 59, as curvas em azul correspondem às duas repetições da parede P244, confeccionadas com pregos 2,7 x 50 (tipo anelado), cravados por pregadeira pneumática, ao passo que as curvas em preto e vermelho correspondem às paredes P244-pregoliso, construídas

com pregos 16 x 24 (tipo liso). Durante o ensaio de uma das repetições, o transdutor de deslocamento que efetuava a leitura dos deslocamentos de topo da parede se desprendeu do suporte, não permitindo que se obtivesse a curva força-deslocamento completa (curva em vermelho na Figura 59). Entretanto, observa-se que até o ponto medido as duas curvas referentes a este prego são semelhantes, apresentando o trecho inicial idêntico para as duas repetições. Além disso, as duas repetições obtiveram valores semelhantes para a força máxima alcançada.

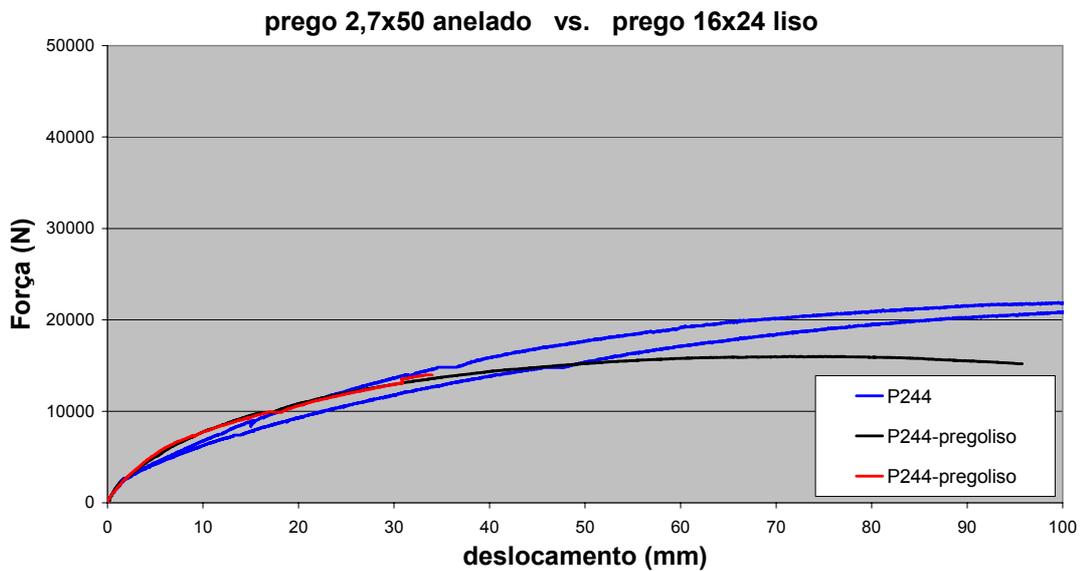


Figura 59 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com 2,44m de comprimento.

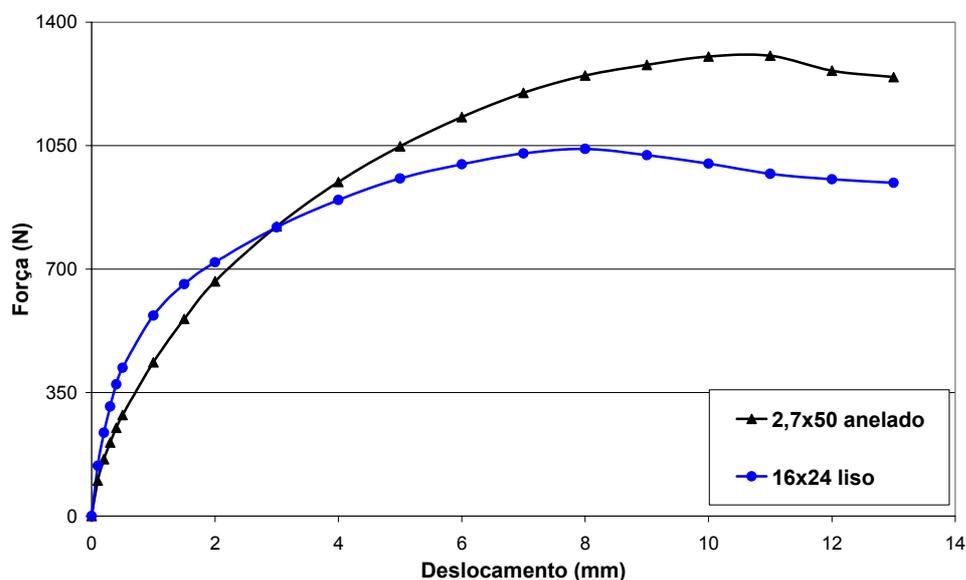


Figura 60 – Diferença de comportamento dos pregos 2,7x50 anelado e 16x24 liso no ensaio das ligações.

Analisando-se o diagrama força-deslocamento no topo da parede das duas configurações de parede, observa-se que os trechos iniciais têm inclinação semelhante, embora as paredes feitas com prego 16x24-liso apresentem uma rigidez ligeiramente superior, analogamente ao mostrado no ensaio das ligações (Figura 60). A partir de determinado ponto, entretanto, a capacidade resistente da parede confeccionada com pregos 16 x 24-liso não acompanha a da parede feita com pregos 2,7 x 50-anelado. Isto também está em sintonia com aquilo mostrado no ensaio das ligações pregadas, onde o prego 2,7x50-anelado obteve força máxima significativamente superior.

### 5.2.1.2 Parâmetros de desempenho

A Tabela 15 abaixo apresenta os valores dos parâmetros de desempenho, definidos no capítulo 3, para os protótipos P244 e P244-pregoliso.

Tabela 15 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação do tipo de prego

| PAREDE                 |              | $F_{m\acute{a}x}$<br>(N) | $\delta_{Fm\acute{a}x}$<br>(mm) | $S_u$<br>(N/m) | $0,4 * F_{m\acute{a}x}$<br>(N) | $\delta_{0,4 * Fm\acute{a}x}$<br>(mm) | $G'$<br>(N/mm) |
|------------------------|--------------|--------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>P244-prego liso</b> | Protótipo 1  | 15999                    | 72,4                            | 6557           | 6399                           | 7,1                                   | 1020           |
|                        | Protótipo 2  | 17959                    | ----                            | 7360           | 7183                           | 8,5                                   | 956            |
|                        | <b>Média</b> | <b>16979</b>             | ----                            | <b>6959</b>    | 6791                           | 7,8                                   | <b>988</b>     |
| <b>P244</b>            | Protótipo 1  | 22023                    | 101,2                           | 9026           | 8809                           | 12,8                                  | 779            |
|                        | Protótipo 2  | 21562                    | 102,8                           | 8837           | 8625                           | 17,4                                  | 561            |
|                        | <b>Média</b> | <b>21793</b>             | 102                             | <b>8932</b>    | 8717                           | 15,1                                  | <b>670</b>     |

A força máxima média do prego 2,7x50-anelado, no ensaio das ligações pregadas, foi aproximadamente 28% maior do que a do prego 16x24-liso. No ensaio das paredes com 2,44m de comprimento, a capacidade máxima de força da parede feita com o prego 2,7x50-anelado foi igualmente 28% maior do que a parede feita com o prego liso. Isto evidencia a relação direta entre a resistência da ligação pregada e a capacidade resistente da parede sob força lateral.

Com relação à rigidez aparente, os valores calculados mostram que a parede feita com pregos 16x24-liso apresenta uma rigidez cerca de 47% maior que a parede feita com pregos 2,7x50-anelado. LAM et al (1997), ao realizarem ensaios com paredes de 7,3m de comprimento, também verificaram que os pregos lisos comuns apresentaram maior rigidez porém menor resistência do que as paredes feitas com pregos espiralados.

O parâmetro de rigidez serve para dar uma noção da rigidez de cada parede, porém não pode ser usado para fins de comparação entre diferentes configurações de parede, pois leva em consideração a inclinação da reta passando pela origem e pelo ponto correspondente a 40% da força máxima; como as paredes estruturais têm um comportamento nitidamente não-linear, o ponto referente a 40% da força máxima para a parede de maior resistência corresponderá a um maior deslocamento, implicando portanto num valor mais baixo da rigidez aparente.

### 5.2.1.3 Comportamento Geral e Modo de Ruptura

O comportamento das duas configurações de parede foi semelhante. A presença do dispositivo de ancoragem limitou significativamente o desprendimento do montante tracionado em relação à base. Isto fez com que as ligações pregadas fossem carregadas até a ruptura, que ocorreu por rasgamento ao longo das arestas das chapas. Pode-se notar na Figura 61 a movimentação relativa entre as chapas, que demonstra que as ligações pregadas foram solicitadas ao extremo de sua resistência.



Figura 61 – Detalhes do ensaio das paredes P244 e P244-pregoliso.

O deslocamento do montante extremo tracionado foi semelhante para as duas configurações de parede, conforme mostra a Figura 62. Quando as paredes atingiram a força máxima, o deslocamento do montante tracionado foi da ordem de 6mm a 12mm.

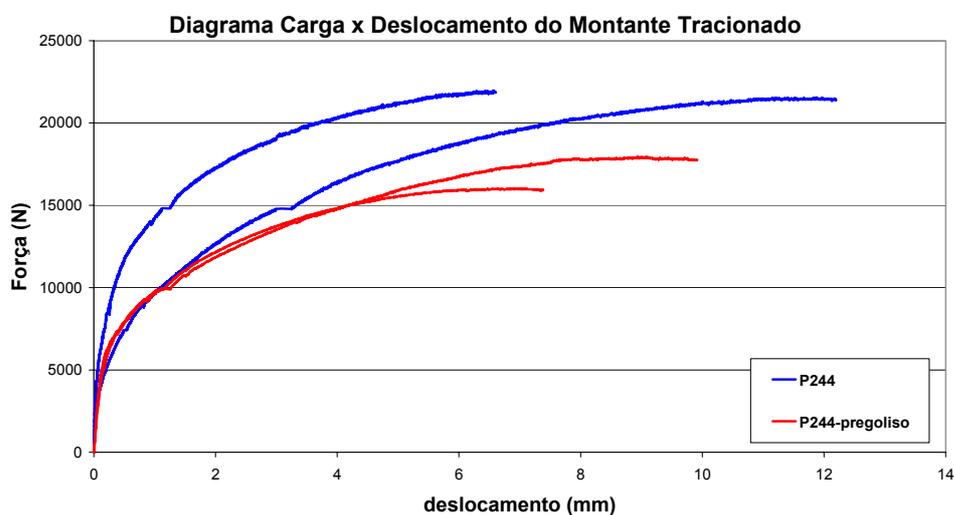


Figura 62 – Diagrama mostrando a separação do montante tracionado em função da força na parede.

Nas paredes com pregos lisos, houve arrancamento do prego associado à solicitação lateral, próximo à força máxima dos protótipos, conforme ilustrado na Figura 63. Nas paredes com pregos anelados isto não acontece, pois os anéis do prego fornecem uma boa fixação na madeira.



Figura 63 - Arrancamento dos pregos no protótipo com prego 16x24 liso.

#### 5.2.1.4 Determinação das Solicitações e Deslocamentos a partir dos Modelos de Cálculo

Por serem as paredes totalmente fechadas e com ancoragem dos montantes extremos, foi empregado o modelo do Eurocode 5 para predição da força máxima. Os valores obtidos por meio do modelo de cálculo estão contidos na Tabela 16, juntamente com os resultados de ensaio. O desenvolvimento dos cálculos pode ser encontrado no anexo I.

Tabela 16 - Comparativo entre força real e estimada para as paredes P244 e P244-pregoliso

| <b>Parede</b>         | <b>Carga Máxima -<br/>Ensaio -<br/>(N)</b> | <b>Carga Máxima -<br/>Eurocode 5 -<br/>(N)</b> | <b>Carga estimada /<br/>Carga ensaio<br/>(%)</b> |
|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>P244</b>           | 21793                                      | 19556                                          | 89,7                                             |
| <b>P244-pregoliso</b> | 16979                                      | 15286                                          | 90,0                                             |

A Tabela 16 mostra que o modelo de cálculo do Eurocode 5, baseado na força máxima obtida no ensaio das ligações, conseguiu uma predição da capacidade resistente da parede com boa aproximação (da ordem de 90%), tanto para as paredes feitas com o prego 2,7x50-anelado como para o prego 16x24-liso

O deslocamento de topo das paredes foi calculado com base no modelo adotado pelos códigos norte-americanos, para a força correspondente a 40% da força máxima. Os valores estão contidos na Tabela 17. Observa-se que o modelo consegue uma aproximação razoável, porém fornece deslocamentos inferiores aos obtidos nos ensaios.

Tabela 17 - Comparativo entre o deslocamento real e estimado para as paredes P244 e P244-pregoliso

| <b>Parede</b>         | <b><math>\delta (0,4 \cdot F_{\text{máx}})</math></b> | <b><math>\delta (0,4 \cdot F_{\text{máx}})</math></b> | <b>Diferença</b>                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                       | <b>- ensaio -</b>                                     | <b>- estimado -</b>                                   | <b><math>\delta (0,4 \cdot F_{\text{máx}})</math><br/>estimado/<br/>ensaio</b> |
|                       | <b>(mm)</b>                                           | <b>(mm)</b>                                           | <b>(—)</b>                                                                     |
| <b>P244</b>           | 15,1                                                  | 11,04                                                 | 73,1                                                                           |
| <b>P244-pregoliso</b> | 7,8                                                   | 4,45                                                  | 57,1                                                                           |

### 5.2.2 Varição do comprimento das paredes

Esta série teve por objetivo observar o desempenho de paredes estruturais quando se varia o comprimento. Foram avaliados os resultados de ensaio dos protótipos P244, P366 e P488, cujos comprimentos são de 2,44m, 3,66m e 4,88m, respectivamente.

Os protótipos apresentam as seguintes características comuns: são totalmente fechados (sem presença de aberturas); a fixação da dupla travessa inferior é feita através dos parafusos de fixação de 5/8" ( $\varnothing = 15,8\text{mm}$ ), espaçados a cada 406mm, prendendo as duas peças da travessa à base; têm ancoragem plena (dispositivos especiais de ancoragem); utilizam pregos 2,7 x 50 (tipo anelado), cravados por pregadeira pneumática.

#### 5.2.2.1 Diagrama força-deslocamento

Os resultados de ensaio mostraram que a capacidade resistente foi proporcional ao comprimento das paredes. A parede com 3,66m de comprimento atingiu força máxima 52% maior que a parede com 2,44m de comprimento, enquanto que a parede com 4,88m de comprimento resistiu a uma força máxima 101% maior que a da parede menor. Além disso, o comportamento foi bastante semelhante para todas as repetições.

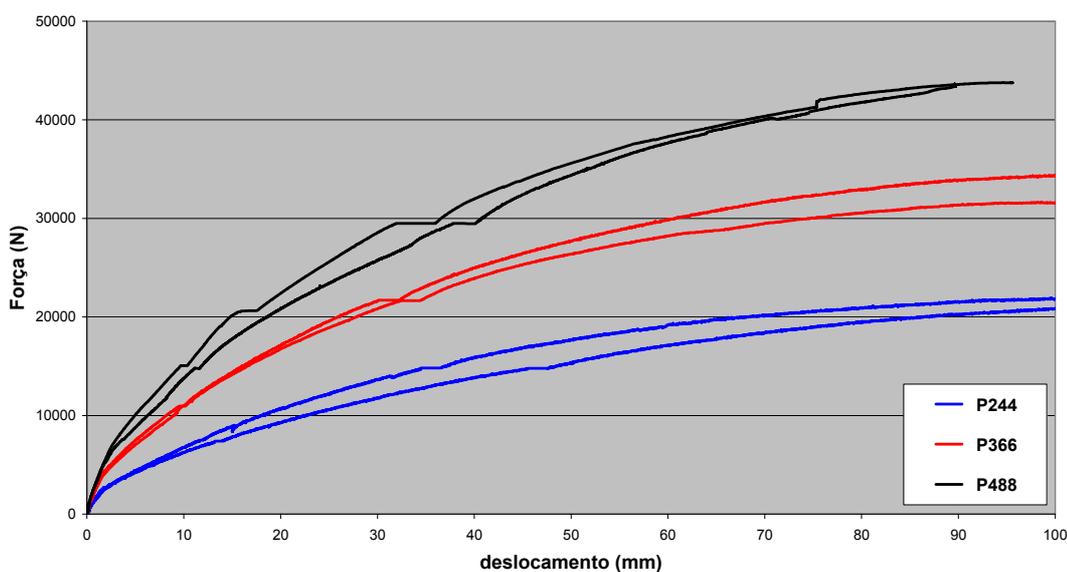


Figura 64 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com comprimentos de 2,44m, 3,66m e 4,88m.

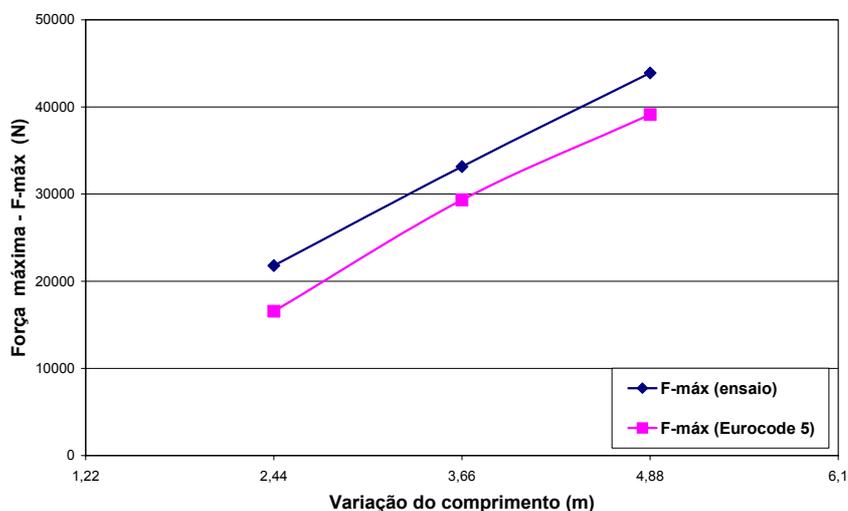


Figura 65 – Relação entre a variação do comprimento da parede e a força máxima alcançada.

A proporcionalidade entre a resistência das paredes e seu comprimento fica igualmente clara quando se obtém o diagrama força-deslocamento em função da força por comprimento, dividindo-se a força máxima pelo comprimento. Como pode ser observado na Figura 66, as curvas são praticamente idênticas para todos os comprimentos ensaiados.

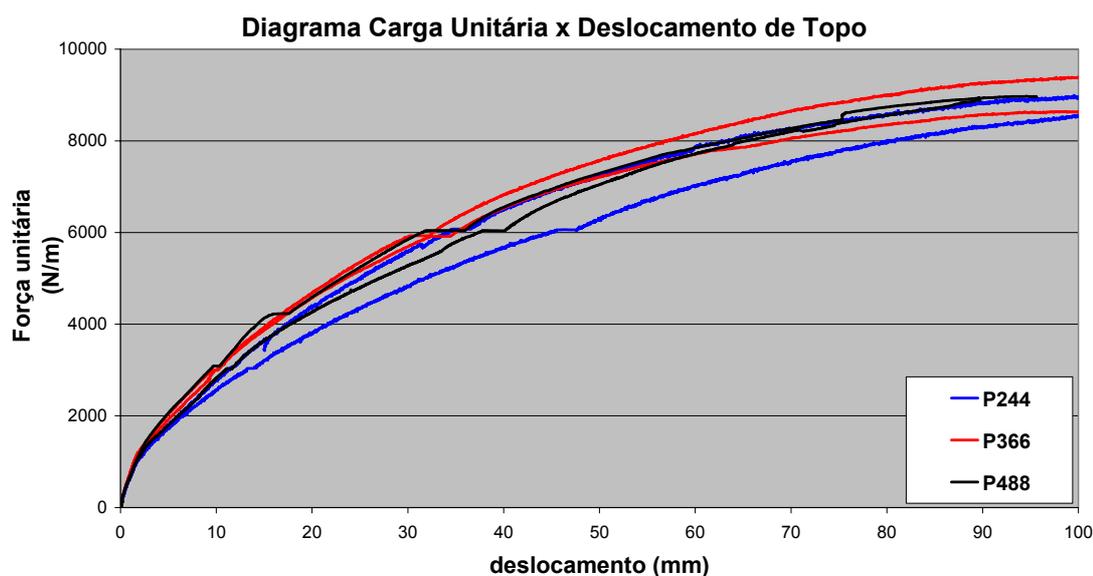


Figura 66 - Diagrama força-deslocamento em função da força por comprimento.

### 5.2.2.2 Parâmetros de desempenho

A Tabela 18 abaixo apresenta os valores dos parâmetros de desempenho, definidos no capítulo 3, para os protótipos P244, P366 e P488.

Tabela 18 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação do comprimento

| PAREDE             |              | Carga Máxima            | Deslocamento<br>(carga<br>máxima) | Carga Máxima<br>Unitária | 40% da Carga<br>Máxima      | Deslocamento<br>(0,4*F <sub>máx</sub> ) | Rigidez<br>Aparente |
|--------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
|                    |              | F <sub>máx</sub><br>(N) | δ <sub>Fmáx</sub><br>(mm)         | S <sub>u</sub><br>(N/m)  | 0,4*F <sub>máx</sub><br>(N) | δ <sub>0,4*Fmáx</sub><br>(mm)           | G'<br>(N/mm)        |
| <b>P244-anc-pf</b> | Protótipo 1  | 22023                   | 101,2                             | 9026                     | 8809                        | 12,8                                    | 779                 |
|                    | Protótipo 2  | 21562                   | 102,8                             | 8837                     | 8625                        | 17,4                                    | 561                 |
|                    | <b>Média</b> | <b>21793</b>            | 102,0                             | <b>8932</b>              | 8717                        | 15,1                                    | <b>670</b>          |
| <b>P366-anc-pf</b> | Protótipo 1  | 31622                   | 98,2                              | 8640                     | 12649                       | 12,4                                    | 769                 |
|                    | Protótipo 2  | 34678                   | 104,4                             | 9475                     | 13871                       | 14,1                                    | 742                 |
|                    | <b>Média</b> | <b>33150</b>            | 101,3                             | <b>9058</b>              | 13260                       | 13,3                                    | <b>756</b>          |
| <b>P488-anc-pf</b> | Protótipo 1  | 44017                   | 89,4                              | 9020                     | 17607                       | 14,8                                    | 673                 |
|                    | Protótipo 2  | 43787                   | 94,5                              | 8973                     | 17515                       | 12,4                                    | 799                 |
|                    | <b>Média</b> | <b>43902</b>            | 92,0                              | <b>8997</b>              | 17561                       | 27,2                                    | <b>736</b>          |

### 5.2.2.3 Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo

Por serem as paredes totalmente fechadas e com ancoragem dos montantes extremos, foi empregado o modelo do Eurocode 5 para predição da força máxima. Os valores obtidos por meio do modelo de cálculo estão contidos na Tabela 19, juntamente com os resultados de ensaio.

Tabela 19 - Comparativo entre força real e prevista para as paredes P244 e P244-pregoliso

| Parede      | Carga Máxima - | Carga Máxima - | Carga estimada / |
|-------------|----------------|----------------|------------------|
|             | Ensaio         | Eurocode 5     | Carga ensaio     |
|             | (N)            | (N)            | (—)              |
| <b>P244</b> | 21793          | 19556          | 89,7             |
| <b>P366</b> | 33150          | 29334          | 88,5             |
| <b>P488</b> | 43902          | 39112          | 89,1             |

A força máxima estimada pelo modelo do Eurocode 5 foi de aproximadamente 90% da força máxima obtida em ensaio, denotando boa aproximação para as três configurações de parede onde se variou o comprimento.

O deslocamento de topo das paredes foi calculado com base no modelo adotado pelos códigos norte-americanos, tanto para a força máxima bem como para força correspondente a 40% da força máxima. Os valores estão contidos na Tabela 20.

Tabela 20 - Comparativo entre o deslocamento real e estimado para as paredes P244, P366 e P488

| Parede      | $\delta (0,4 * F_{\text{máx}})$ | $\delta (0,4 * F_{\text{máx}})$ | Diferença                                       | $\delta$ |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------|
|             | - ensaio -                      | - estimado -                    | $(0,4 * F_{\text{máx}})$<br>estimado/<br>ensaio |          |
|             | (mm)                            | (mm)                            | (%)                                             |          |
| <b>P244</b> | 15,1                            | 11,27                           | <b>74,6</b>                                     |          |
| <b>P366</b> | 13,3                            | 11,26                           | <b>84,7</b>                                     |          |
| <b>P488</b> | 13,6                            | 10,76                           | <b>79,1</b>                                     |          |

Os valores determinados para o deslocamento de topo da parede correspondentes a 40% da força máxima foram inferiores aos valores da deslocamento real de topo, situando-se na faixa de 75% a 85% dos valores medidos em ensaio.

#### 5.2.2.4 Comportamento Geral e Modo de Ruptura

O comportamento das paredes P244, P366 e P488 foi bastante semelhante. A presença do dispositivo de ancoragem limitou significativamente o desprendimento do montante tracionado em relação à base, levando à ruptura por rasgamento das chapas ao longo das arestas inferiores. As figuras abaixo mostram as deformações ocorridas em detalhe.



Figura 67 – Detalhes do ensaio das paredes P488.



Figura 68 - Separação semelhante entre as chapas de fechamento junto à base, no ensaio da parede P488.

### 5.2.3 Variação da taxa de aberturas

Os protótipos desta série são semelhantes, porém variando-se a taxa de aberturas das paredes ( $r$ ). Fazem parte deste comparativo os protótipos P488 (sem aberturas,  $r = 1$ ), P488-1P1J (contendo uma porta e uma janela,  $r = 0,646$ ) e P488-2J (contendo duas janelas,  $r = 0,491$ ).

Os protótipos apresentam as seguintes características comuns: a fixação da dupla travessa inferior é feita através dos parafusos de fixação de 5/8" ( $\varnothing = 15,8\text{mm}$ ), espaçados a cada 406mm, prendendo as duas peças da travessa à base; têm ancoragem plena (dispositivos especiais de ancoragem); utilizam pregos 2,7 x 50 (tipo anelado), cravados por pregadeira pneumática.

As vergas de portas e janelas foram compostas por duas peças paralelas, de mesma seção que o restante da ossatura (seção 2"x 4"), separadas por uma chapa de OSB com espessura de 12mm, suficiente para equiparar a largura total da verga à dos montantes e demais elementos da ossatura ( $38 + 38 + 12 = 88\text{mm} \approx 89\text{mm}$  da ossatura). Para unir as peças, foram usados pregos 2,7 x 70 (tipo anelado) espaçados a cada 400mm (usados sempre dois pregos nas extremidades de peças). A ligação das vergas aos montantes verticais foi feita através de 4 pregos 2,7 x 70 (tipo anelado) cravados de topo.

A ligação dos umbrais aos montantes verticais foi feita por meio de pregos 2,7 x 70 (tipo anelado) a cada 400 mm (usados sempre dois pregos nas extremidades de peças). Nas contravergas de janelas, a ligação aos montantes inferiores foi feita com 2 pregos 19 x 36 (tipo liso) cravados de topo.

#### 5.2.3.1 Diagrama força-deslocamento

O diagrama força-deslocamento (Figura 69) mostra que o comportamento das paredes cai acentuadamente em função da presença de aberturas, ainda que as paredes contivessem dispositivos de ancoragem. A força máxima da parede totalmente fechada (sem aberturas) foi, respectivamente, 85% e 171% maior que a força máxima das paredes com taxas de aberturas  $r = 0,646$  e  $r = 0,491$ . A rigidez da parede totalmente fechada foi também nitidamente superior à das paredes com aberturas.

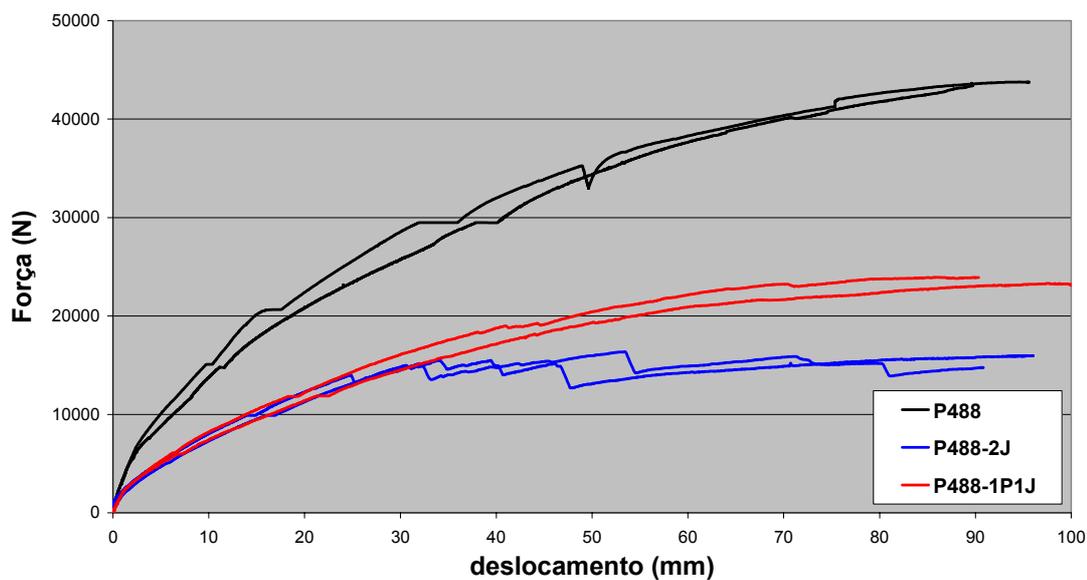


Figura 69 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com variação da taxa de aberturas.

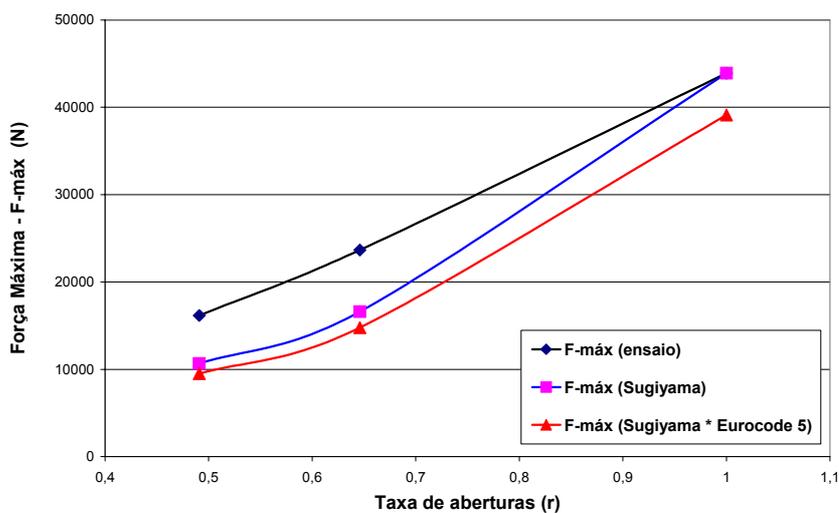


Figura 70 – Relação entre a variação da taxa de aberturas (r) em função da força máxima.

### 5.2.3.2 Parâmetros de desempenho

A Tabela 21 abaixo apresenta os valores dos parâmetros de desempenho, definidos no capítulo 3, para os protótipos P488, P488-1P1J e P488-2J.

Tabela 21 - Parâmetros de desempenho para as paredes com variação da taxa de aberturas

| Parede                  |              | Carga Máxima            | Deslocamento<br>(carga<br>máxima) | Carga Máxima<br>Unitária | 40% da Carga<br>Máxima      | Deslocamento<br>(0,4*F <sub>máx</sub> ) | Rigidez<br>Aparente |
|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
|                         |              | F <sub>máx</sub><br>(N) | δ <sub>Fmáx</sub><br>(mm)         | S <sub>u</sub><br>(N/m)  | 0,4*F <sub>máx</sub><br>(N) | δ <sub>0,4*Fmáx</sub><br>(mm)           | G'<br>(N/mm)        |
| <b>P488-anc-pf</b>      | Protótipo 1  | 44017                   | 89,4                              | 9020                     | 17607                       | 14,8                                    | 673                 |
|                         | Protótipo 2  | 43787                   | 94,5                              | 8973                     | 17515                       | 12,4                                    | 799                 |
|                         | <b>Média</b> | <b>43902</b>            | <b>92,0</b>                       | <b>8997</b>              | <b>17561</b>                | <b>27,2</b>                             | <b>736</b>          |
| <b>P488-anc-pf-1P1J</b> | Protótipo 1  | 23292                   | 98,8                              | 4773                     | 9317                        | 14,6                                    | 361                 |
|                         | Protótipo 2  | 24041                   | 90,8                              | 4926                     | 9616                        | 13,1                                    | 415                 |
|                         | <b>Média</b> | <b>23667</b>            | <b>94,8</b>                       | <b>4850</b>              | <b>9467</b>                 | <b>13,9</b>                             | <b>388</b>          |
| <b>P488-anc-pf-2J</b>   | Protótipo 1  | 15970                   | ----                              | 3272                     | 6388                        | 7                                       | 516                 |
|                         | Protótipo 2  | 16373                   | ----                              | 3355                     | 6549                        | 8,5                                     | 436                 |
|                         | <b>Média</b> | <b>16172</b>            | <b>----</b>                       | <b>3314</b>              | <b>6469</b>                 | <b>7,8</b>                              | <b>476</b>          |

### 5.2.3.3 Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo

Por serem as paredes construídas com ancoragem plena dos montantes extremos, foi empregado o modelo de Sugiyama para a determinação do fator de redução da força máxima. Neste caso, a Tabela 22 apresenta os valores de força máxima para o fator de redução (F) aplicado à força máxima obtida em ensaio, bem como à força máxima prevista pelo modelo do Eurocode 5.

Tabela 22 - Comparativo entre força real e prevista para as paredes P488, P488-1P1J e P488-2J

| Parede           | Fator de<br>Redução (F) -<br>Sugiyama | Carga<br>Máxima -<br>Ensaio | F * F <sub>ensaio</sub> | Carga<br>estimada /<br>Carga Ensaio | F * F <sub>EC5</sub> | Carga<br>estimada EC5/<br>Carga ensaio |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|
|                  | (—)                                   | (N)                         | (N)                     | (—)                                 | (N)                  | (—)                                    |
| <b>P488</b>      | 1,0                                   | 43902                       | —                       | —                                   | 39112                | —                                      |
| <b>P488-1P1J</b> | 0,378                                 | 23667                       | 16595                   | 0,70                                | 14784                | 0,62                                   |
| <b>P488-2J</b>   | 0,243                                 | 16172                       | 10668                   | 0,66                                | 9504                 | 0,59                                   |

Os resultados apresentados na tabela acima mostram que, para as paredes com ancoragem dos montantes extremos e presença de aberturas de portas e janelas, o modelo de Sugiyama fornece valores conservadores, da ordem de 60% a 70% dos valores obtidos em ensaio.

#### 5.2.3.4 Comportamento Geral e Modo de Ruptura

Nas paredes com duas aberturas de janela não ocorreu o rasgamento da aresta inferior das chapas, causada pelos pregos, diferentemente das paredes anteriores. Conforme mostra a Figura 72, a pregação da travessa inferior apresentou deslocamentos mínimos, mesmo sob força máxima. Isto denota que estes pregos não atingiram sua capacidade máxima resistente. Nestes protótipos, a ruptura ocorreu pelo cisalhamento das chapas de fechamento, próximo aos cantos inferiores das janelas. Isto corrobora a afirmação de HE et al. (1997) de que nas paredes com aberturas há concentração de tensões próximo aos cantos das aberturas, causando ruptura da chapa de fechamento, ao contrário das paredes totalmente fechadas, onde o desempenho da ligação na base governa o modo de ruptura da parede.

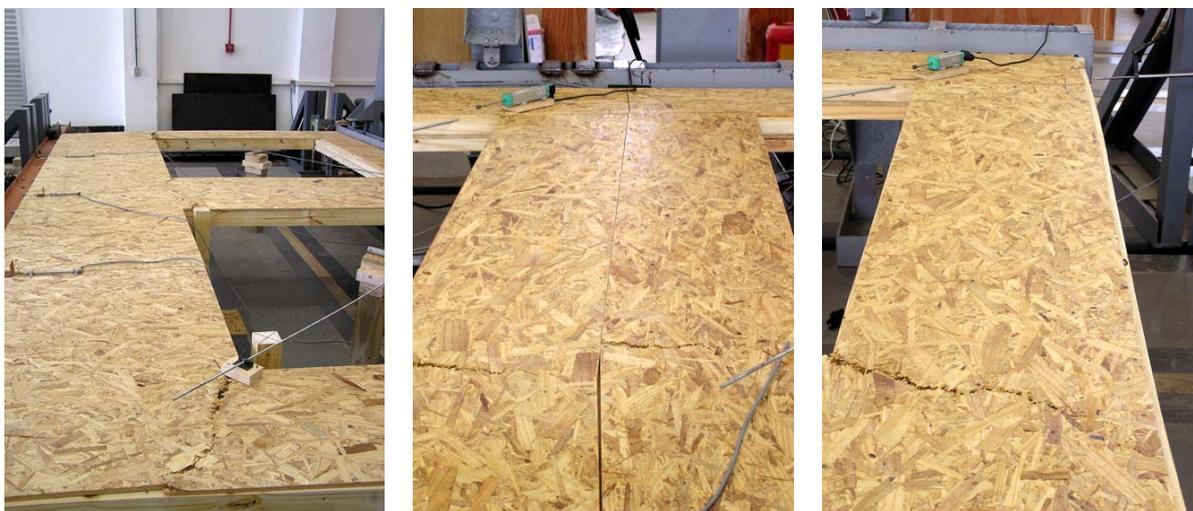


Figura 71 – Ruptura pelo rasgamento das chapas nos cantos de janela nos protótipos P488-2J.



Figura 72 – Pequena separação entre chapas próximo à base, para a parede P488-2J

Os protótipos de parede com uma abertura de porta e uma de janela, por não serem simétricos, foram ensaiados de modo invertido em relação à posição das aberturas, nas duas repetições. Nestas paredes, ocorreu desprendimento do montante lateral da porta, visto que o dispositivo de ancoragem estava preso ao montante duplo extremo. O desprendimento do montante causou flexão da travessa inferior da parede. Observa-se que o posicionamento deste parafuso próximo à abertura contribuiu para a limitação destes deslocamentos. Aparte este desprendimento, ocorreu concomitantemente o cisalhamento das chapas de fechamento, próximo aos cantos da abertura.



Figura 73 - Ensaio dos protótipos P488-1P1J.

## 5.2.4 Variação do nível de ancoragem e fixação

Esta série apresenta um comparativo do desempenho de paredes com diferentes níveis de ancoragem e fixação à base, tanto em paredes totalmente fechadas (sem aberturas), quanto em paredes contendo aberturas de janela.

### 5.2.4.1 Configuração dos Protótipos

Fazem parte desta avaliação os protótipos P488, com ancoragem dos montantes extremos, os protótipos P488-pf (sem dispositivos de ancoragem), cuja fixação da dupla travessa à base é feita com parafusos de fixação de 5/8" ( $\varnothing = 15,8\text{mm}$ ), espaçados a cada 406mm, e os protótipos P488-pg (sem dispositivos de ancoragem), os quais, na fixação da dupla travessa inferior, somente a guia (peça inferior da dupla travessa) foi fixada à base por meio de parafusos de fixação, sobre a qual a ossatura foi apoiada e fixada através de pregos. Para esta pregação, em cada segmento entre montantes foram cravados quatro pregos 2,7 x 70 (tipo anelado), em ziguezague, utilizando-se a pregadeira pneumática.



Figura 74 - Fixação por pregos da segunda travessa inferior à guia previamente presa à base por parafusos.

Além dos protótipos indicados acima, fazem parte deste comparativo os protótipos P488-2J, contendo dispositivos de ancoragem e fixação da travessa inferior à base através dos parafusos

de fixação de 5/8" ( $\varnothing = 15,8\text{mm}$ ), espaçados a cada 406mm, e os protótipos P488-2J-pf, que se diferenciam do anterior somente pela ausência dos dispositivos de ancoragem.

#### 5.2.4.2 Diagrama força-deslocamento

Para as paredes sem aberturas, é interessante notar, observando-se o diagrama força-deslocamento da Figura 75, que, em todas as curvas, o trecho inicial possui inclinação semelhante e que, a partir de determinado ponto, as paredes que não contêm dispositivos de ancoragem começam a perder rigidez e perdem a capacidade resistente num patamar bem abaixo das paredes com boa ancoragem do montante extremo tracionado.

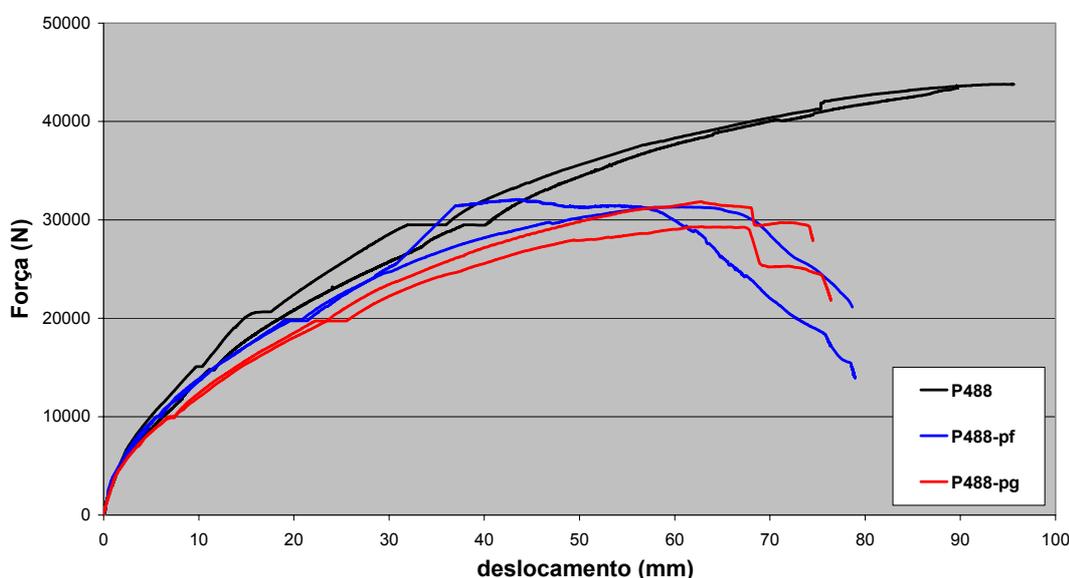


Figura 75 - Diagrama força-deslocamento para as paredes totalmente fechadas e com variação do nível de fixação e ancoragem.

Nas paredes com duas aberturas de janela (com ou sem dispositivo de ancoragem), as curvas de desempenho mostradas no diagrama força-deslocamento abaixo são muito semelhantes. Isto pode ser explicado pelo modo de ruptura das paredes com aberturas, que ocorre por colapso (cisalhamento) das chapas de fechamento, próximo aos cantos inferiores das paredes, e não por despreendimento do montante tracionado e conseqüente rasgamento das chapas ao longo das arestas das chapas, junto à travessa inferior das paredes. Este modo de ruptura pôde ser observado em todos os ensaios de paredes com aberturas, independentemente do nível de ancoragem.

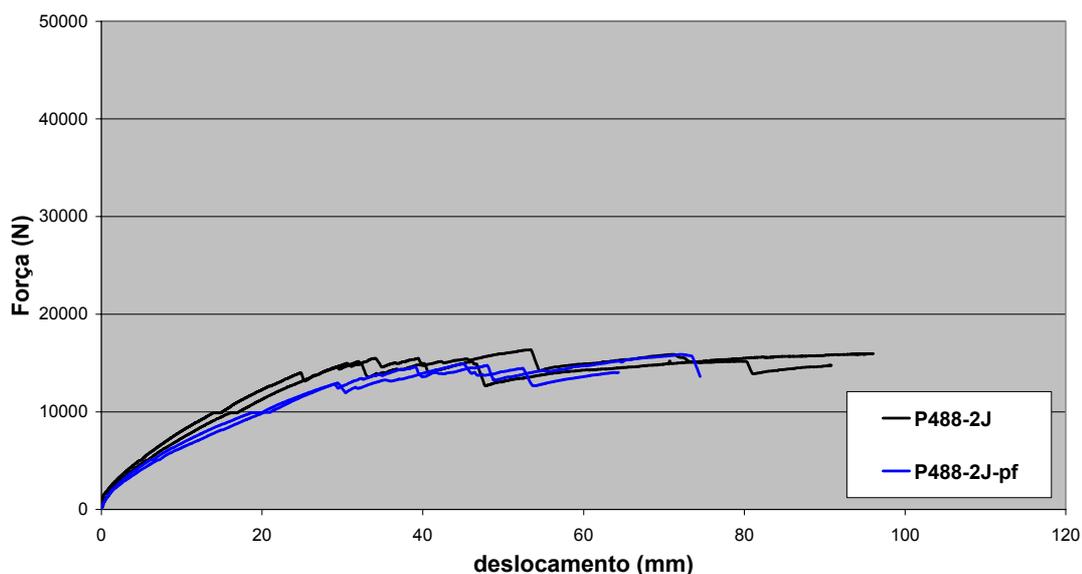


Figura 76 - Diagrama força-deslocamento para as paredes com aberturas e variação do nível de fixação e ancoragem.

### 5.2.4.3 Parâmetros de desempenho

A Tabela 23 abaixo apresenta os valores dos parâmetros de desempenho, definidos no capítulo 3, para os protótipos P488, P488-2J, P488-pf, P488-pg e P488-2J-pf.

Tabela 23 - Parâmetros de desempenho para as paredes totalmente fechadas, com variação do nível de fixação e ancoragem

| Parede                  |              | Carga Máxima            | Deslocamento (carga máxima)       | Carga Máxima Unitária | 40% da Carga Máxima               | Deslocamento ( $0,4 \cdot F_{\text{máx}}$ ) | Rigidez aparente |
|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|------------------|
|                         |              | $F_{\text{máx}}$<br>(N) | $\delta_{F_{\text{máx}}}$<br>(mm) | $S_u$<br>(N/m)        | $0,4 \cdot F_{\text{máx}}$<br>(N) | $\delta_{0,4 \cdot F_{\text{máx}}}$<br>(mm) | $G'$<br>(N/mm)   |
| <b>P488-anc-pf</b>      | Protótipo 1  | 44017                   | 89,4                              | 9020                  | 17607                             | 14,8                                        | 673              |
|                         | Protótipo 2  | 43787                   | 94,5                              | 8973                  | 17515                             | 12,4                                        | 799              |
|                         | <b>Média</b> | <b>43902</b>            | <b>92</b>                         | <b>8997</b>           | <b>17561</b>                      | <b>27,2</b>                                 | <b>736</b>       |
| <b>P488-s/anc-pf</b>    | Protótipo 1  | 32083                   | 43,3                              | 6575                  | 12833                             | 8,6                                         | 843              |
|                         | Protótipo 2  | 32302                   | 60,6                              | 6415                  | 12521                             | 8,7                                         | 814              |
|                         | <b>Média</b> | <b>32193</b>            | <b>52</b>                         | <b>6495</b>           | <b>12677</b>                      | <b>8,7</b>                                  | <b>829</b>       |
| <b>P488-s/anc-prego</b> | Protótipo 1  | 31838                   | 62,8                              | 6524                  | 12735                             | 10,5                                        | 686              |
|                         | Protótipo 2  | 29280                   | 62,6                              | 6000                  | 11712                             | 9,6                                         | 690              |
|                         | <b>Média</b> | <b>30559</b>            | <b>62,7</b>                       | <b>6262</b>           | <b>12224</b>                      | <b>10,1</b>                                 | <b>688</b>       |
| <b>P488-anc-pf-2J</b>   | Protótipo 1  | 15970                   | ----                              | 3272                  | 6388                              | 7                                           | 516              |
|                         | Protótipo 2  | 16373                   | ----                              | 3355                  | 6549                              | 8,5                                         | 436              |
|                         | <b>Média</b> | <b>16172</b>            | <b>----</b>                       | <b>3314</b>           | <b>6469</b>                       | <b>7,8</b>                                  | <b>476</b>       |
| <b>P488-s/anc-pf-2J</b> | Protótipo 1  | 14913                   | 45,1                              | 3056                  | 5965                              | 8,1                                         | 416              |
|                         | Protótipo 2  | 15878                   | 72,1                              | 3254                  | 6351                              | 10                                          | 359              |
|                         | <b>Média</b> | <b>15396</b>            | <b>58,6</b>                       | <b>3155</b>           | <b>6158</b>                       | <b>9,1</b>                                  | <b>388</b>       |

#### 5.2.4.4 Determinação da Força a partir dos Modelos de Cálculo

Os modelos matemático e empírico de NI e KARACABEYLI (2000) foram desenvolvidos para paredes sem aberturas de portas e/ou janelas, e sem dispositivos de ancoragem para prender os montantes extremos. Ambos os modelos fornecem um fator de redução ( $\alpha$ ) a ser aplicado sobre uma parede semelhante, porém com ancoragem plena dos montantes extremos.

A Tabela 24 apresenta a determinação da força máxima das paredes P488-s/anc-pf (fixadas à base somente por parafusos de fixação) e P488-s/anc-pg (fixação à base por pregos unindo as duas peças da travessa inferior), com base no fator de redução proposto por NI e KARACABEYLI (2000). Para estes protótipos, foi adotado  $\phi = 0$ , que indica não haver nenhuma ancoragem da parede, seja por peso próprio da parede, sobrecargas de utilização, ou interseção de cantos de parede.

Tabela 24 - Força real e estimada (modelo matemático de NI e KARACABEYLI, 2000)

| Parede  | Fator de Redução ( $\alpha$ ) - NI e KARACABE YLI | Carga Máxima - Ensaio | $\alpha * F_{\text{ensaio}}$ | Carga estimada / Carga ensaio | $\alpha * F_{\text{EC5}}$ | Carga estimada EC5 / Carga ensaio |
|---------|---------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|         | (—)                                               | (N)                   | (N)                          | (—)                           | (N)                       | (—)                               |
| P488    | 1,0                                               | 43902                 | —                            | —                             | 39112                     | —                                 |
| P488-pf | 0,583                                             | 32193                 | 25595                        | 0,80                          | 22802                     | 0,71                              |
| P488-pg |                                                   | 30559                 |                              | 0,84                          |                           | 0,75                              |

Tabela 25 - Força real e estimada (modelo empírico de NI e KARACABEYLI, 2000)

| Parede  | Fator de Redução ( $\alpha$ ) - NI e KARACABE YLI | Carga Máxima - Ensaio - | $\alpha * F_{\text{ensaio}}$ | Carga estimada / Carga ensaio | $\alpha * F_{\text{EC5}}$ | Carga estimada EC5 / Carga ensaio |
|---------|---------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|         | (—)                                               | (N)                     | (N)                          | (—)                           | (N)                       | (—)                               |
| P488    | 1,0                                               | 43902                   | —                            | —                             | 39112                     | —                                 |
| P488-pf | 0,639                                             | 32193                   | 28053                        | 0,87                          | 24993                     | 0,78                              |
| P488-pg |                                                   | 30559                   |                              | 0,92                          |                           | 0,82                              |

Os modelos matemático e empírico de NI e KARACABEYLI (2000) forneceram resultados com boa aproximação, quando comparados aos valores de ensaio, porém ligeiramente conservadores. Os resultados do modelo empírico se aproximaram mais dos experimentais do que os do modelo analítico.

A rigor, nenhum dos modelos apresentados no capítulo 3 foi desenvolvido para paredes com aberturas de portas ou janelas e sem ancoragem dos montantes extremos. Entretanto, como o desempenho das paredes contendo aberturas foi semelhante, independentemente do nível de ancoragem e devido à ruptura ter ocorrido na chapa de fechamento próximo aos cantos de janelas, a aplicação do modelo de Sugiyama para estas paredes forneceria valores de força máxima pertinentes.

#### 5.2.4.5 Comportamento Geral e Modo de Ruptura

##### a) Paredes totalmente fechadas (sem aberturas)

Nas paredes com fixação apenas por parafusos ou por pregos (sem dispositivos de ancoragem dos montantes extremos), um ponto importante que merece atenção é o fato de ambos terem apresentado comportamento semelhante. Isto ocorre devido ao modo como as forças são distribuídas nestas paredes. Com a ausência do dispositivo de ancoragem, que evita que o montante extremo tracionado se desprenda da travessa inferior, as forças atuantes nesta região são resistidas pelos pregos ao longo da aresta inferior das chapas, junto à travessa inferior das paredes. Estes pregos são mais solicitados do que nas paredes plenamente ancoradas, e são responsáveis pela perda de rigidez e resistência destas paredes. Como a pregação periférica é idêntica para todos os protótipos, o rasgamento da aresta inferior das chapas nos protótipos sem ancoragem ocorreu em função da capacidade de carga destes pregos. A Figura 77 mostra o rasgamento da chapa de fechamento junto à travessa inferior e o desprendimento do montante tracionado, para as duas configurações sem dispositivo de ancoragem.

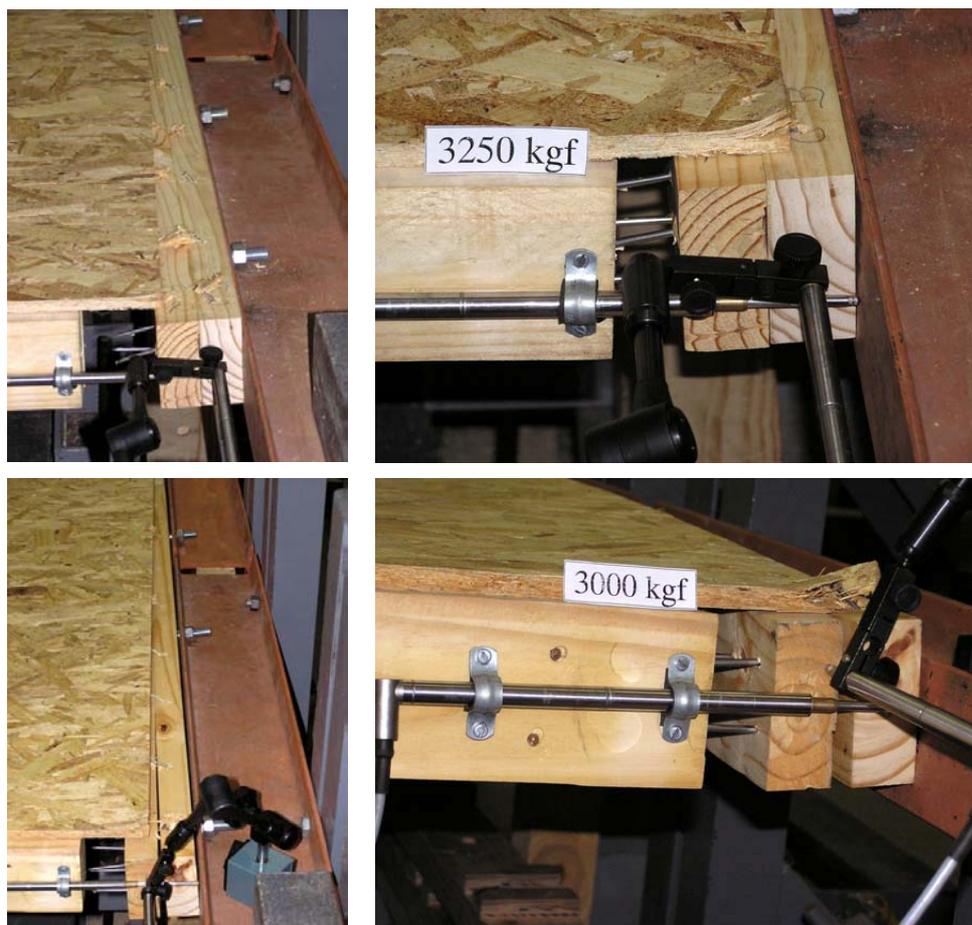


Figura 77 – Rasgamento das chapas e separação do montante tracionado. Acima: protótipos P488-pf; abaixo: protótipos P488-pg.

#### b) Paredes com duas aberturas de janela

No caso das paredes com duas aberturas de janela, o comportamento foi muito semelhante, independentemente da presença do dispositivo de ancoragem prendendo o montante extremo. Em ambos os casos, a ruptura ocorreu nas chapas de fechamento, não ocorrendo desprendimento do montante tracionado e o conseqüente rasgamento das arestas inferiores das chapas, que permaneceram praticamente intactas, conforme pode ser visto na Figura 78.



Figura 78 - Ensaio dos protótipos P488-2J-pf. À esquerda: movimentação mínima das chapas sob força máxima; ao centro e à direita: rasgamento das chapas de fechamento.

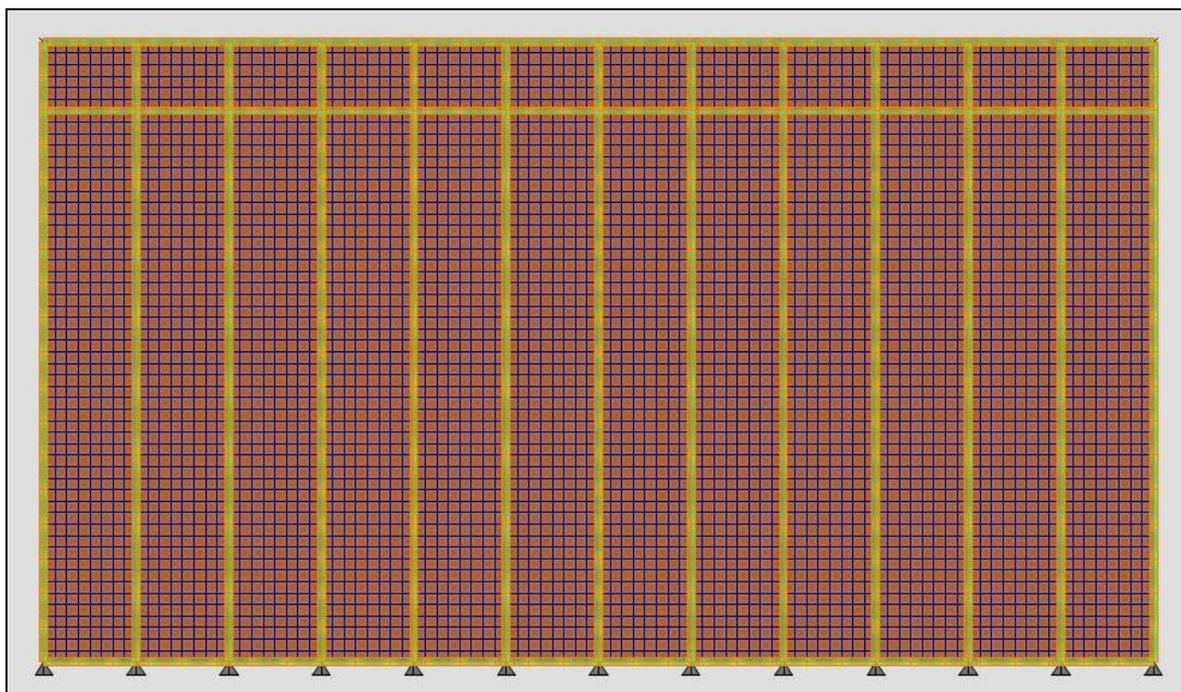
## 6 ANÁLISE NUMÉRICA BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Foi feita a análise numérica de uma parede P488, que tem 4,88 m de comprimento, sem aberturas de portas e janelas e com montantes extremos ancorados à fundação, utilizando-se o programa computacional SAP 2000, versão 8, tendo por objetivo comparar as respostas do modelo numérico aos resultados experimentais.

### 6.1 Descrição do modelo desenvolvido

As peças da ossatura em madeira da parede foram discretizadas como elementos de barra, com área da seção transversal de 38 mm x 89 mm para os montantes internos e de 76 mm x 89 mm para os montantes extremos e as travessas inferior e superior da parede. A ligação entre as peças da ossatura foi considerada articulada, permitindo o livre giro. Em determinados pontos das barras da travessa inferior, nos locais referentes aos parafusos de fixação da parede, foram restringidos os movimentos de translação destes nós segundo a direção do comprimento e também perpendicular ao plano da parede. Os nós da travessa superior tiveram seus deslocamentos restringidos fora do plano da parede, reproduzindo a situação de ensaio, na qual os roletes acoplados à travessa superior impediam este movimento.

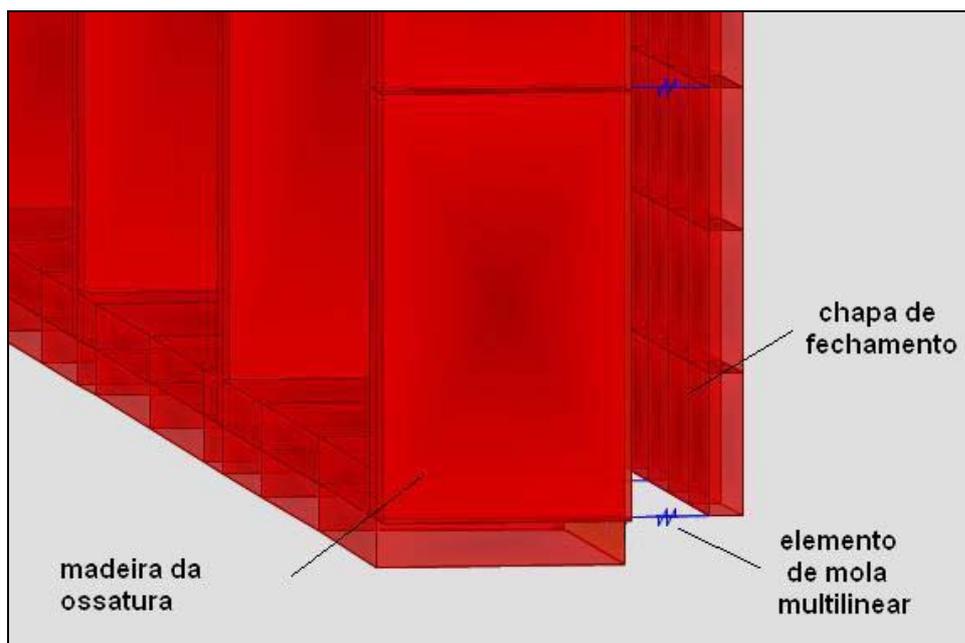
Para modelar as chapas de fechamento (OSB), foram empregados elementos de casca (*Shell*) do tipo membrana, que consideram apenas os esforços de membranas no plano das chapas. Foi utilizada uma malha de 51 mm x 51 mm, perfazendo 1152 elementos de casca para cada chapa inteira e 144 elementos de casca para cada pedaço de chapa utilizado para completar a altura da parede, totalizando 5184 elementos de casca para a parede inteira. A Figura 79 mostra o modelo desenvolvido para as paredes.



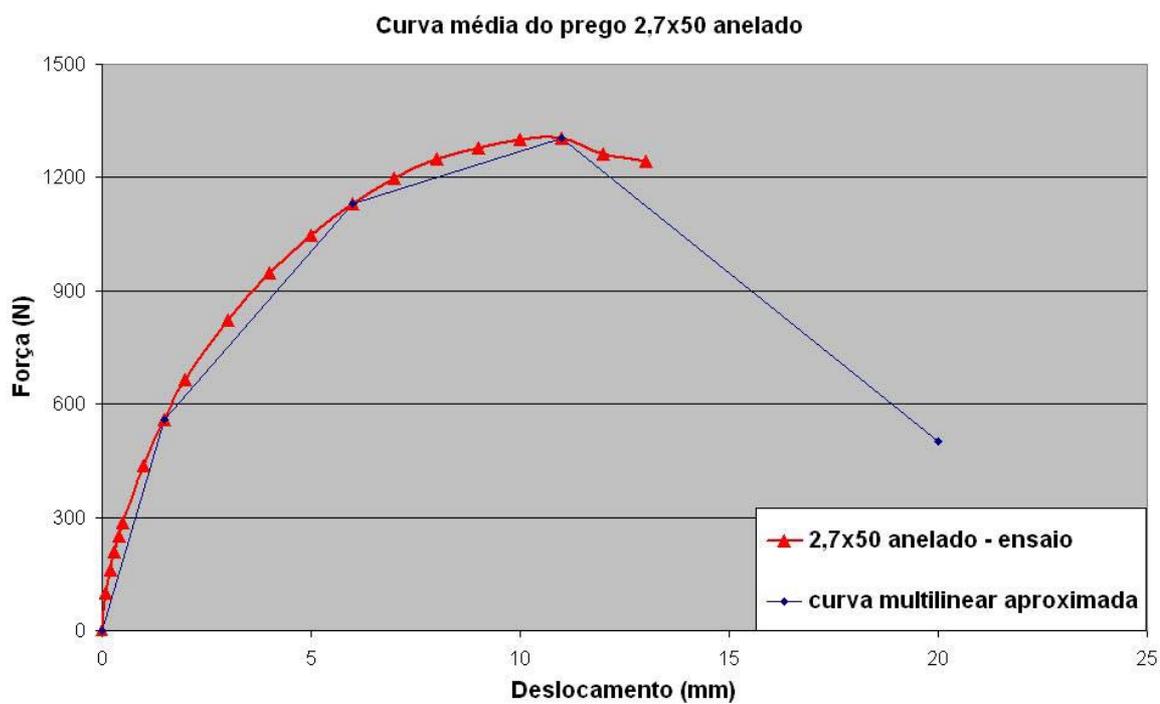
**Figura 79** – Modelo desenvolvido para a parede P488.

As chapas estão situadas num plano afastado de 30 mm do plano da ossatura da parede, havendo entre ambos elementos de ligação (pregos) concebidos como elementos de mola do tipo multilinear. Este tipo de elemento de mola permite que se aproxime a curva não-linear da ligação pregada através de segmentos retilíneos, sendo fornecidos ao programa os pares de valores força-deslocamento referentes aos segmentos usados na aproximação. Foram acrescentados elementos de mola a cada 150 mm ao longo das arestas das chapas e a cada 300 mm ao longo dos montantes internos, conforme a pregação utilizada na confecção dos protótipos ensaiados.

A Figura 80 mostra, na forma extrudada, para melhor visualização, os elementos de barra da ossatura e os elementos de placa das chapas de fechamento, ambos unidos pelos elementos de mola multilineares. A Figura 81 mostra a seqüência de segmentos retilíneos utilizada na aproximação para ajustar a curva média do prego 2,7 x 50 (tipo anelado) utilizado nas paredes.



**Figura 80** – Detalhe da ligação entre barra da ossatura e chapa de fechamento.

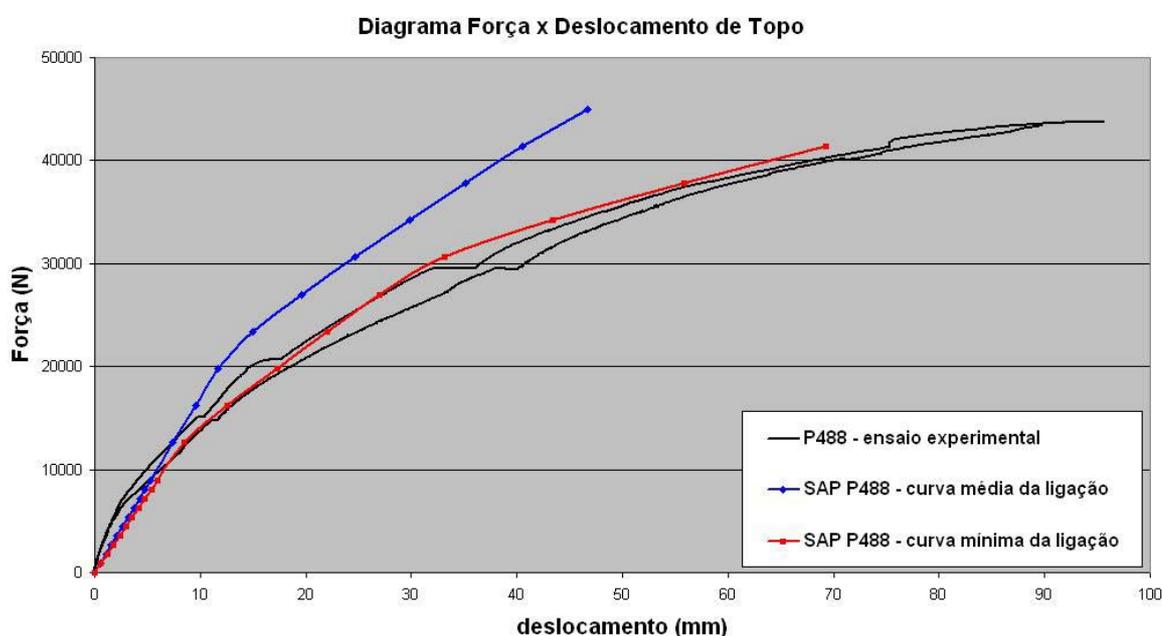


**Figura 81** – Aproximação da curva força-deslocamento da ligação pregada através de segmentos retilíneos.

A carga foi aplicada de modo distribuído em 12 pontos ao longo da travessa superior da parede. Foi realizada uma análise não-linear, com 10 incrementos de carga de 900 N (perfazendo um subtotal de 9000 N) e, em seguida, outros 9 incrementos de 3600 N, atingindo a carga final de 41400 N. Isto possibilitou o traçado do diagrama força-deslocamento no topo da parede.

## 6.2 Resultados da Análise Numérica e Discussões

A Figura 82 apresenta o diagrama força-deslocamento para a parede P488, mostrando os resultados experimentais para os dois protótipos ensaiados e também as curvas obtidas através do modelo numérico, onde se pode observar a diferença de comportamento ao se utilizar as curvas média e mínima do prego 2,7 x 50 (tipo anelado), obtidas na etapa de ensaio das ligações pregadas.



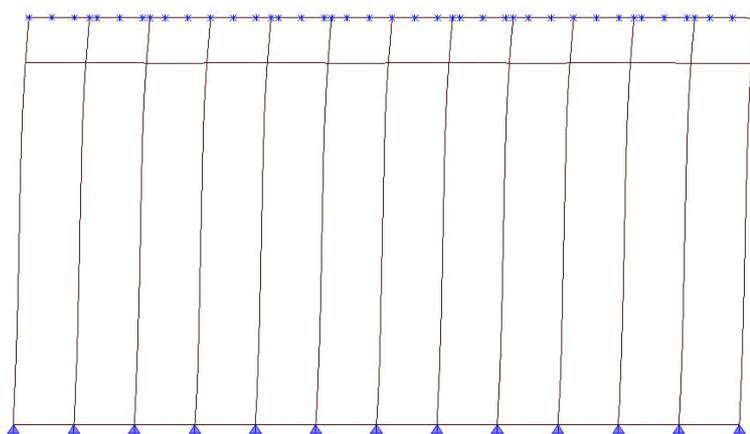
**Figura 82 – Diagrama força-deslocamento de topo: modelo numérico e experimental.**

O modelo numérico, embora tenha representado o comportamento não-linear esperado, apresentou o trecho inicial do diagrama força-deslocamento de topo menos rígido do que o referente aos ensaios experimentais. Após a carga aproximada de 13000 N, entretanto, este

comportamento inverteu e o modelo numérico tornou-se mais rígido. Os resultados obtidos, inserindo-se no elemento de mola os dados da curva mínima do ensaio das ligações, mostraram melhor aproximação do que quando se utilizou a curva média das ligações. Isto pode ter sido ocasionado pela heterogeneidade do lote de madeiras fornecido para a etapa experimental da pesquisa. Como o desempenho da ligação pregada tem papel fundamental no comportamento da parede como um todo, qualquer variação desta propriedade pode afetar significativamente a resposta da parede às solicitações laterais.

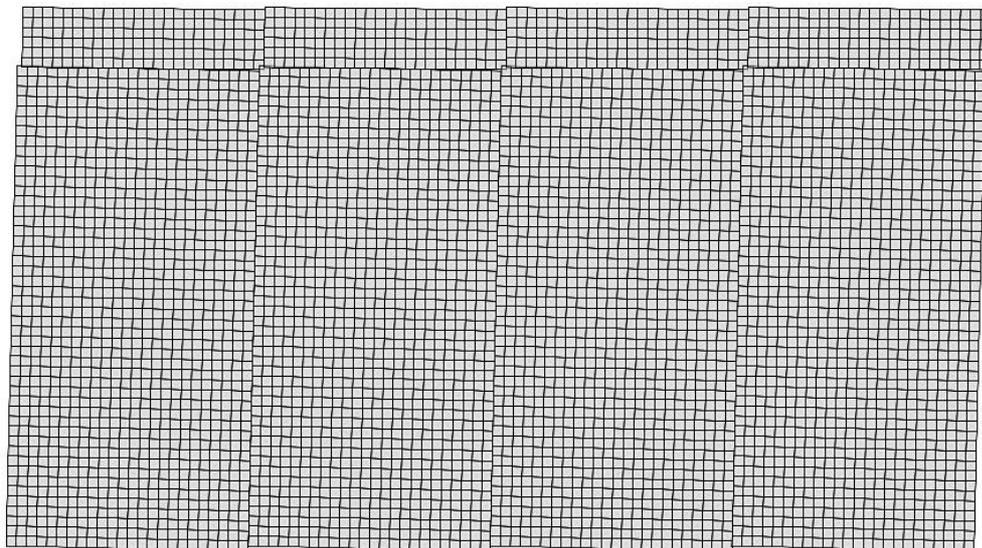
Comparando-se a resposta do modelo numérico com os ensaios experimentais em laboratório, pode-se tecer as seguintes observações:

- As reações verticais de apoio se concentraram nos montantes extremos (tracionado e comprimido), havendo parcelas bastante inferiores nos demais pontos de apoio ao longo da travessa inferior. Isto está de acordo com o modelo simplificado de distribuição dos esforços, que prevê que toda a reação vertical de apoio, causada pela tendência de giro da parede, é resistida pelos montantes extremos;
- A configuração deformada dos montantes verticais no modelo numérico, causada pelos esforços de flexão, foi idêntica à observada nos ensaios experimentais, conforme mostra a Figura 83;



**Figura 83** – Configuração deformada da ossatura da parede.

- A movimentação relativa entre as chapas de fechamento, apresentada pelo modelo numérico, refletiu de modo fiel a movimentação registrada nos ensaios experimentais, conforme pode ser visto na Figura 84;



**Figura 84** – Movimentação relativa entre as chapas de fechamento no modelo numérico.

- A distribuição de esforços nos elementos de mola (representativos das ligações pregadas) esteve de acordo com o esperado, isto é, os pregos da periferia das chapas foram mais solicitados do que os pregos situados no alinhamento dos montantes internos às chapas.

### **6.3 Análise Paramétrica do Deslocamento no Topo da Parede**

O deslocamento no topo das paredes estruturais solicitadas lateralmente é composto por quatro parcelas de deslocamento, conforme visto no capítulo 3. Analisando-se os resultados calculados por meio da fórmula contida nos códigos norte-americanos (ver item 3.3.5), observa-se que a parcela de deslocamento referente ao deslizamento das ligações pregadas responde por quase a totalidade do deslocamento de topo da parede, como pode ser visto na Tabela 26, para o caso da parede P488.

Tabela 26 – Participação percentual das parcelas de deslocamento de topo da parede estrutural.

| <b>Deslocamento de topo da parede P488</b>   | <b>Participação percentual (%)</b> |
|----------------------------------------------|------------------------------------|
| Flexão das peças de madeira de Pinus         | 1,14                               |
| Distorção por cisalhamento das chapas de OSB | 4,42                               |
| Deslizamento das ligações pregadas           | 92,75                              |
| Separação do montante tracionado             | 1,69                               |

Como se pode observar, a contribuição do deslizamento das ligações pregadas é de aproximadamente 95% do deslocamento total da parede, havendo pouca participação da flexão da madeira da ossatura, relacionada diretamente ao Módulo de Elasticidade (E), e do cisalhamento das chapas de OSB, relacionada diretamente ao Módulo de Elasticidade Transversal (G).

Variando-se estas propriedades no modelo numérico, pode-se efetuar um estudo paramétrico sobre a influência das propriedades mecânicas da madeira da ossatura e da chapa de fechamento, avaliando-se o quanto estes parâmetros podem afetar o comportamento da parede estrutural. Assim sendo, na Figura 85 e na Figura 86 observa-se a variação das curvas do diagrama força-deslocamento de topo quando se empregam valores do Módulo de Elasticidade da Madeira (E) e do Módulo de Elasticidade Transversal da chapa de OSB (G) correspondentes ao dobro e à metade do valor de referência.

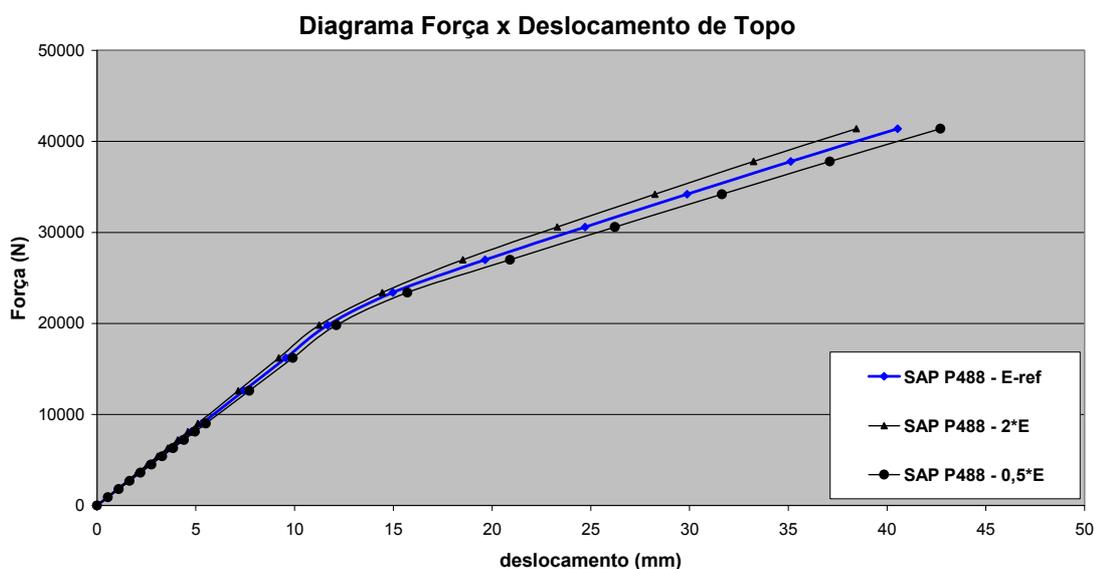


Figura 85 – Variação do diagrama força-deslocamento de topo no modelo numérico, ao se variar o Módulo de Elasticidade da Madeira de *Pinus*.

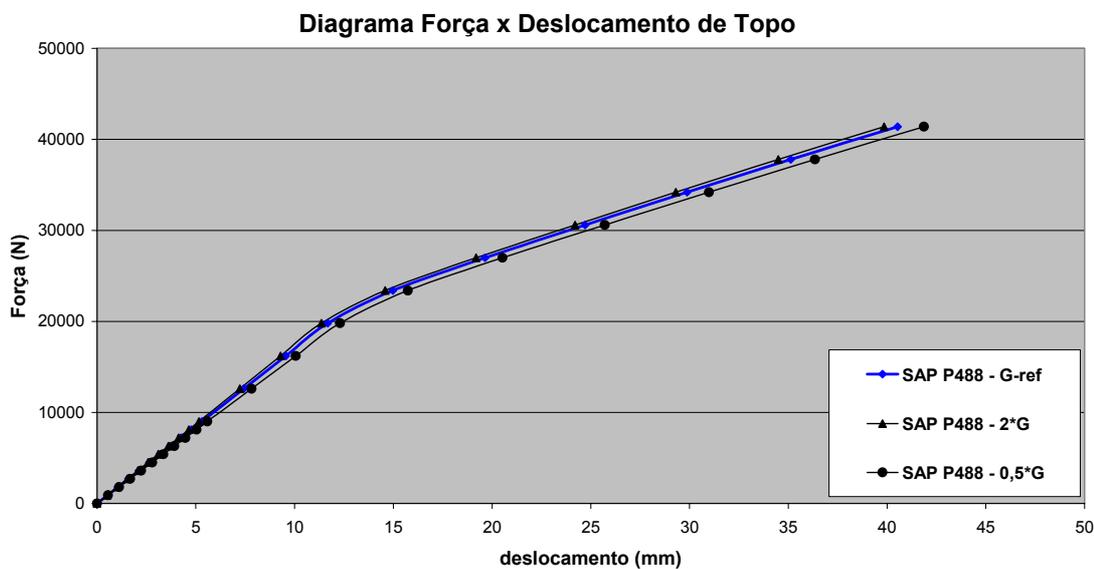


Figura 86 - Variação do diagrama força-deslocamento de topo no modelo numérico, ao se variar o Módulo de Elasticidade Transversal da chapa de OSB.

Analisando-se os diagramas acima, percebe-se que a contribuição das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus* e da chapa de fechamento não altera de modo relevante a curva força-deslocamento no topo ao se variar seus valores, indicando que a resposta da parede estrutural às solicitações laterais é mais sensível ao comportamento da ligação pregada, que tem uma grande importância no desempenho global da parede.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

As informações advindas dos ensaios das paredes em tamanho real permitiram uma melhor compreensão dos mecanismos de ação das forças laterais agindo sobre estes elementos. Além disso, forneceram um panorama amplo da real resistência de paredes de sistemas leves em madeira confeccionadas com matérias-primas nacionais facilmente encontradas no mercado, como por exemplo a madeira serrada de Pinus, as chapas de OSB e pregos lisos, anelados ou espiralados, tanto para cravação por martelo como por pregadeira pneumática. Isso tudo pode contribuir para a disseminação e aprimoramento do Sistema Plataforma em nosso país, uma vez que fornece subsídios para o emprego correto e seguro dos elementos de parede nas edificações, principalmente em regiões com ventos fortes.

A revisão bibliográfica abordou de forma clara e concisa a ação das forças sobre os elementos da edificação, oferecendo uma fonte de consulta que possibilita a compreensão dos mecanismos de ação, em especial quanto às forças laterais. Além disso, identificou as principais variações da técnica construtiva das paredes e o que isto pode influenciar no seu comportamento.

A extensa etapa experimental de ensaios propiciou informações importantes acerca do comportamento das paredes sob carregamento lateral monotônico, podendo ser tiradas algumas conclusões, descritas a seguir, que contemplam as questões relacionadas aos objetivos propostos na pesquisa:

- A utilização da pregadeira pneumática na confecção dos protótipos de parede agiliza consideravelmente o trabalho, pois é empregada uma grande quantidade de pregos nestes elementos.
- A norma ASTM E-564 (1995) mostrou-se adequada para o ensaio dos protótipos de parede em tamanho real. Os dispositivos especialmente confeccionados para os ensaios, baseados nas recomendações da norma, conseguiram representar de modo fiel as condições de serviço.

- Nos ensaios de paredes com 2,44m de comprimento, nas quais se variou o tipo de prego utilizado, permanecendo inalterados os demais parâmetros, ficou evidenciada a relação entre a resistência da ligação pregada (obtida em ensaio específico), e a resistência da parede sob força lateral. Isto confirma a tese de que o comportamento da parede é governado pelo comportamento da ligação pregada, sendo portanto um parâmetro de suma importância.
- Os ensaios de paredes onde se variou o comprimento (2,44m, 3,66m e 4,88m), permanecendo inalterados os demais parâmetros, mostraram que a capacidade resistente das paredes quanto às forças laterais é proporcional ao seu comprimento. Ao se trabalhar com a força por comprimento, dividindo-se a força pelo comprimento da parede, o diagrama força por comprimento-deslocamento mostra as curvas sobrepostas.
- Os ensaios de paredes bem ancoradas, onde se variou a taxa de aberturas ( $r = 1,0$ ,  $r = 0,646$  e  $r = 0,491$ ), permanecendo inalterados os demais parâmetros, mostraram que a capacidade resistente das paredes é proporcional à taxa de aberturas. Entretanto, a forma de ruptura das paredes difere. Nas paredes sem aberturas ( $r = 1,0$ ), a ruptura ocorre nas ligações pregadas, normalmente por rasgamento das chapas de fechamento ao longo de sua aresta inferior. No caso das paredes contendo porta, verificou-se o desprendimento do montante lateral da porta em relação à base, indicando necessidade de sua ancoragem. Porém, nas paredes com aberturas a ruptura sempre se deu por cisalhamento das chapas de fechamento junto aos cantos das aberturas de janela. Nestes casos, a utilização de chapas de fechamento de maior espessura ou um reforço local devem aumentar consideravelmente a resistência destas paredes.
- O ensaio de paredes totalmente fechadas (sem aberturas), onde se variou o nível de fixação e ancoragem, mostrou que os dispositivos especiais de ancoragem exercem um papel importante, impedindo que o montante extremo tracionado se desprenda da base. Ao se omitir este dispositivo, a resistência e a rigidez das paredes diminuem consideravelmente, tanto em paredes com fixação por parafusos como em paredes onde a travessa inferior simples foi pregada a uma guia parafusada à base. Em ambos os casos, a ausência do dispositivo de ancoragem resultou na transferência das forças de tração do montante para os pregos situados ao longo da aresta inferior das chapas de fechamento, ficando a resistência

destas paredes condicionada à resistência destes pregos. Supõe-se que o aumento da densidade de pregos ao longo da aresta inferior das chapas possa melhorar o desempenho destas paredes. Entretanto, não deve ser especificada uma densidade muito alta de pregos, pois pode acarretar a ruptura da travessa inferior por fendilhamento.

- Quando foram ensaiadas paredes com duas aberturas de janela, onde se variou o nível de ancoragem, o diagrama força-deslocamento mostrou um comportamento absolutamente semelhante, independentemente da presença ou não do dispositivo de ancoragem. Isto se deve ao fato da ruptura acontecer pelo cisalhamento das chapas de fechamento próximo aos cantos das janelas, e não pela capacidade resistente da ligação pregada. De fato, nestes ensaios não houve movimentação relativa entre as chapas na região abaixo das aberturas.
- O modelo de cálculo do Eurocode 5, aplicável às paredes bem ancoradas e sem aberturas, forneceu resultados coerentes da capacidade resistente das paredes, apesar de ligeiramente conservadores. Os resultados obtidos segundo este modelo variaram entre 70% e 90% da capacidade resistente dos protótipos ensaiados.
- O modelo de cálculo encontrado nos códigos norte-americanos para a determinação dos deslocamentos de topo das paredes estruturais forneceu resultados inferiores aos deslocamentos reais medidos nos ensaios. A este respeito, é importante salientar que a parcela de deslocamento devido ao deslizamento da ligação responde por quase a totalidade do deslocamento da parede, sendo os demais deslocamentos bastante ínfimos. Assim sendo, a coleta de dados de deslocamentos, obtidas no ensaio das ligações pregadas pela ASTM D-1761 (2000) exercem um papel fundamental na predição dos deslocamentos das paredes por meio do modelo de cálculo contido nos códigos norte-americanos.
- O modelo de SUGIYAMA para o cálculo da capacidade resistente das paredes bem ancoradas e com aberturas de portas e/ou janelas forneceu resultados coerentes, embora conservadores, situados entre 60% e 70% da resistência obtida nos ensaios.
- Os modelos matemático e empírico de NI e KARACABEYLI para o cálculo da capacidade resistente de paredes sem aberturas e sem ancoragem dos montantes extremos mostrou resultados coerentes, embora conservadores, situados entre 70% e 90% da resistência obtida nos ensaios.

Conclui-se, com base nos dados experimentais obtidos neste trabalho, que o desempenho das paredes estruturais dependem fundamentalmente do comportamento das ligações pregadas, e que estes elementos são capazes de desenvolver resistência e rigidez frente às solicitações laterais de modo previsível, embora alguns pontos ainda necessitem de aprimoramento através de novas pesquisas. Contudo, denota-se a viabilidade técnica na utilização das paredes estruturais de sistemas leves em madeira (Sistema Plataforma), podendo contribuir para o desenvolvimento do setor de edificações em madeira no Brasil.

Para a continuidade dos estudos das paredes de sistemas leves em madeira, submetidas a carregamento lateral, recomenda-se o aprofundamento de pesquisas relacionadas à análise numérica, segundo o Método dos Elementos Finitos, pois esta ferramenta pode contribuir de forma significativa para o estudo das paredes estruturais sujeitas a força lateral no seu plano, buscando uma melhor compreensão das diversas variáveis que influenciam o comportamento das paredes, com destaque para os seguintes pontos:

- Modelar as paredes estruturais com aberturas de portas e/ou janelas;
- Modelar paredes com ancoragem convencional, isto é, sem dispositivos especiais de ancoragem dos montantes extremos, possibilitando a separação entre estes montantes e as barras das travessas inferior e superior;
- Comparar os resultados obtidos com a modelagem da parede isoladamente (esquema bidimensional) com a modelagem na qual há presença de paredes transversais (esquema tridimensional), verificando a sua contribuição para a ancoragem das paredes estruturais
- Considerar a atuação de carregamento vertical concomitantemente aos esforços laterais.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Edward; THALLON, Rob. **Fundamentals of residential construction**. 1ª edição. John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque, 2002.

AMBROSE, James. **Simplified design of wood structures**. 5ª edição. John Wiley & Sons, 1994.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **WFCM: Wood frame construction manual for one- and two- family dwellings**. American Forest & Paper Association, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1761-00: Standard test methods for mechanical fasteners in wood**. Philadelphia, PA, 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2719-94: Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness**. Philadelphia, PA, 1994.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 3043-95: Standard methods of testing structural panels in flexure**. Philadelphia, PA, 1995.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 564-95: Standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings**. Philadelphia, PA, 1995.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Diaphragms and shear walls – design and construction guide**. APA – The Engineered Wood Association, 2001.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Introduction to lateral design**. APA – The Engineered Wood Association, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Madeira processada mecanicamente – estudo setorial de 2001**. (ver arquivo ABIMCI EstSet 2001p.pdf)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**. NBR 7190/97. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

BRADFORD, Douglas; SUGIYAMA, Hideo. **Perforated shearwall design approach**. American Forest & Paper Association, 1994.

BREYER, Donald; FRIDLEY, Kenneth; POLLOCK, David; COBEEN, Kelly. **Design of wood structures ASD**. 5ª edição. McGraw-Hill, 2003.

BITTENCOURT, Rosa Maria. **Concepção arquitetônica da habitação em madeira**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing Company, 1993.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 26891**: Timber structures – joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics. Bruxelas: CEN, 1991.

CONSUMO em alta – oferta em baixa. **Revista da Madeira**. Curitiba, 25 (ano IV): 10-13, 1995.

EINSFELD, Ricardo Amorim; PACHECO, Marcus. Utilização de painéis estruturados em habitações residenciais de madeira. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2000, São Carlos/SP. **Anais...** São Carlos/SP: EESP/USP, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. EUROCODE 5. Bruxelas. CEN, 2002.

FAHERTY, Keith; WILLIAMSON, Thomas. **Wood engineering and construction handbook**. 2ª edição. R.R. Donnelly & Sons Company, 1995.

FEIRER, John; HUTCHINGS, Gilbert; FEIRER, Mark. **Carpentry and building construction**. Glencoe/McGraw-Hill, 4a. edição, 1993.

GAUZIN-MÜLLER, Dominique. **Les bois dans la construction**. Editions du Moniteur. Paris, 1990.

GUERTIN, Mike; ARNOLD, Rick. **Precision framing**. The Taunton Press. Newtown, Estados Unidos, 2001.

HE, Ming; MAGNUSSON, H.; LAM, F.; PRION, H.G.L.. **Cyclic performance of perforated wood shear walls with oversize oriented strand board panels**. International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 – Timber Structures. Meeting Thirty. Canadá, 1997.

HEINE, Christian P. **Effect of overturning restraint on the performance of fully sheathed and perforated timber framed shear walls**. Dissertação de mestrado. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, 1997.

ILLINOIS EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Companion manual to the windstorm mitigation manual for light frame construction. Julho, 2000.

INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS (ICBO). **Standards for structural-use panels**. Whittier, Califórnia: ICBO Evaluation Service, Inc., 2002. 7 p. Relatório técnico ER-5681.

INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS (ICBO). **UBC: Uniform building code**, Vol. 2. Whittier, Califórnia: ICBO, 1997.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. **International residential code for one- and two-family dwellings**. International Code Council, 2003.

JOHNSON, Andrew Clark. **Monotonic and cyclic performance of long shear walls with openings**. Dissertação de mestrado. . Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, 1997.

JONES, Jack P. **House framing**. McGraw-Hill, 1995.

KASAL, B.; COLLINS, M.S.; PAEVERE, P.; FOLIENSTE, G.C.. **Design models of light frame wood buildings under lateral loads**. Journal of Structural Engineering, Vol. 130, número 8. ASCE, 2004.

LAM, Frank; PRION, Helmut; HE, Ming. **Lateral resistance of wood shear walls with large sheathing panels**. Journal of Structural Engineering, Vol. 123, número 12. ASCE, 1997.

LINE, Philip. Perforated shear wall design. **Wood Design Focus**, Madison, USA, v. 12, n. 2, p. 3-9, 2002.

LINE, Philip; BRADFORD, Douglas. **Perforated shearwall design method**. In: International Wood Engineering Conference, Vol. 2, pp. 345-349. Nova Orleans, EE.UU., 1996.

MAYO, Richard. **Earthquake design**. In: Residential Structure and Framing – Practical Engineering and Advanced Framing Techniques for Builders. Journal of Light Construction Book, 2001.

MERICO, Luís Fernando Krieger. **Introdução à economia ecológica**. Blumenau, 1996. Editora da FURB, 160pp.

MITIDIARI FILHO, Cláudio Vicente. **Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

MOLITERNO, Antônio. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1981.

NATIONAL ASSOCIATION OF HOME BUILDERS RESEARCH CENTER, INC. (NAHB). **Residential structural design guide: a state-of-the-art review and application of engineering information for light-frame homes, apartments, and townhouses**. Washington, 2000.

NATIONAL ASSOCIATION OF HOME BUILDERS RESEARCH CENTER, INC. (NAHB). The performance of perforated shear walls with narrow wall segments, reduced base restraint, and alternative framing methods. NAHB Research Center, 1998.

NATIONAL ASSOCIATION OF HOME BUILDERS RESEARCH CENTER, INC. (NAHB). **Wood shear walls with corners**. NAHB Research Center, 2001.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Performance standard for wood-based structural-use panels**, Voluntary Product Standard PS2-92. Washington, 1992.

NATTERER, Julius; SANDOZ, Jean Luc; REY, Martial. **Constructions en bois – matériau, technologie et dimensionnement**. Primeira Edição. Presses Polytechnique et Universitaires Romandes. Lausanne, 2004.

NI, Chun; KARACABEYLI, Erol. **Effect of overturning restraint on performance of shear walls**. World Conference on Timber Engineering. Whistler, BC, Canada, 2000.

PATTON-MALLORY, Márcia; WOLFE, Ronald; SOLTIS, Lawrence; GUTKOWSKI, Richard. **Light-frame shear wall length and opening effects.** Journal of Structural Engineering, Vol. 111, número 10. ASCE, 1985.

PRAVIA, Zacarias; GHELEN, Juliano. Um sistema industrializado para moradia popular com estrutura e fechamentos em madeira. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, Uberlândia/MG. **Anais...** Uberlândia/MG: UFU – Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

RANDALL, Robert. **Simple approach to sizing built-up headers.** In: Residential Structure and Framing – Practical Engineering and Advanced Framing Techniques for Builders. Journal of Light Construction Book, 2001.

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

SÁNCHEZ, José Enrique et alli. **Casas de Madera.** Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de Madera y Corcho (AITIM). Madrid, 1995. 699p.

SEDIBOIS. Structures en bois aux états limites – introduction à l’Eurocode 5 (STEP 2), Vol. 2 – Calcul de structure. Éditions Eyrolles, 1997.

SERRETTE, Reynaud; ENCALADA, José; JUADINES, Melissa; NGUYEN, Hoang. **Static racking behavior of plywood, OSB, gypsum, and fiberboard walls with metal framing.** Journal of Structural Engineering, Vol. 123, número 8. ASCE, 1997.

.SHERWOOD, G.; MOODY, R.C. **Light-frame wall and floor systems – analysis and performance.** General Technical Report FPL-GTR-59. Madison, WI. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1989. 162p.

SILVA, Anderson. **Comportamento diafragma de paredes de Madeira no sistema leve plataforma.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

SKAGGS, Thomas; MARTIN, Zeno. **Estimating wood structural panel diaphragm and shear deflection.** Practice Periodical on Structural Design and Construction. ASCE, 2004.

SPELTER, Henry; MCKEEVER, Tim. **A Look at the Road Ahead for Structural Panels.** ; USDA Forest Service, Forest Products Lab. C.C. Crow Publications, Inc. Outubro, 1996.

SPELTER, Henry. **Plywood niche narrows but producers still have ample opportunities.** Revista Panel World, vol 38 no. 5. Setembro, 1997.

STAMATO, Guilherme Corrêa. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada.** Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

SZÜCS, Carlos Alberto; NETO, Almir Barros S.S.; GROHMANN, Sandra Zampieri; LA ROVÉRE, Henriette Lebre. Proposta de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras da madeira. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC: UFSC, 1998.

SZÜCS, Carlos Alberto; VELLOSO, Joana G.; DOMINGHINI, Cherli M.; GIOMBELLI, Grazielle; MOURÃO, Ugo. Nova proposta de corpo-de-prova para a caracterização da resistência ao cisalhamento das madeiras. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá/MT. **Anais...** Cuiabá/MT: UFMT, 2004.

THALLON, Rob. Graphic guide to interior details: for builders and designers. 3<sup>a</sup> edição. Newtown: The Taunton Press, 1997.

THALLON, Rob. Graphic guide to frame construction: details for builders and designers. 7<sup>a</sup> edição. Newtown: The Taunton Press, 2000.

TISSELL, John R. **Wood structural panel shear walls.** Technical Research Report 154. APA – The Engineered Wood Association, 1993.

TUOMI, Roger L.; McCUTCHEON, William J. **Racking strength of light-frame nailed walls.** Journal of the Structural Division, Vol. 104, no. ST7. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1978.

TURNER, J.F.C. **Housing for people.** London: Marion Boyards, 1976.

VELOSO, Luís Augusto C. M. **Paredes Diafragma de Madeira.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

WAGNER, Willis; SMITH, Howard Bud. **Modern Carpentry:** building construction details in easy-to-understand form. The Goodheart-Willcox Company, Inc., 2003.

WOESTE, Frank. **Strength of toe-nails vs. end nails.** In: Residential Structure and Framing – Practical Engineering and Advanced Framing Techniques for Builders. Journal of Light Construction Book, 2001.

YANCEY, C.W.; CHEOK, G.S.; SADEK, F.; MOHRAZ, B.. **A summary of the structural performance of single-family, wood-frame housing.** Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, USA, 1998.

ZERBE, John I. **Wood as a material for conservation of energy.** In: Wood product demand and the environment: Proceedings, international conference; 1991 November 13-14; Vancouver, BC. Madison, WI: Forest Products Research Society; 1992: 223-224.

## ANEXO I – Estimativa da Resistência e Rigidez dos Protótipos de Parede

### A - ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DAS PAREDES

#### A.1 – Modelo do EUROCODE 5

A estimativa da resistência foi feita com base no Método A do Eurocode 5, sendo expressa pela força máxima. O modelo do Eurocode 5 é válido somente para paredes sem aberturas e com ancoragem plena dos montantes extremos. A seguir é apresentado o roteiro de cálculo.

Paredes P244 , P366 e P488 (prego 2,7 x 50 anelado)

Dados necessários:

$b_i = 1220\text{mm}$  (largura de cada segmento de parede)

$s = 150\text{mm}$  (espaçamento entre pregos na periferia das chapas)

$F_{f,Rd} = 1360\text{ N}$  (força máxima alcançada pela ligação pregada, ver item 4.1.3.9)

$$b_0 = \frac{h}{2} = \frac{2760}{2} = 1380\text{mm}$$

$$c_i = \frac{b_i}{b_0} = \frac{1220}{1380} = 0,884 \quad (b_i < b_0)$$

Resistência de cada segmento de parede:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot c_i}{s} = \frac{1360\text{N} \cdot 1220\text{mm} \cdot 0,884}{150} = 9778\text{N}$$

Força máxima estimada para a parede P244:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} = 2 \times 9778\text{N} \quad \therefore \quad \boxed{F_{v,Rd} = 19556\text{N}}$$

- Força máxima estimada para a parede P366:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} = 3 \times 9778N \quad \therefore \quad \boxed{F_{v,Rd} = 29334N}$$

- Força máxima estimada para a parede P488:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} = 4 \times 9778N \quad \therefore \quad \boxed{F_{v,Rd} = 39112N}$$

### Paredes P244-pregoliso

A única diferença entre esta parede e a anterior é o tipo de prego utilizado. Portanto, de modo análogo ao anterior, temos:

$$F_{f,Rd} = 1063 \text{ N (força máxima alcançada pela ligação, ver item 4.1.3.9)}$$

Resistência de cada segmento de parede:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot c_i}{s} = \frac{1063N \cdot 1220mm \cdot 0,884}{150} = 7643N$$

- Força máxima estimada para a parede P244-pregoliso:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} = 2 \times 7643N \quad \therefore \quad \boxed{F_{v,Rd} = 15286N}$$

## A.2 – Modelos Matemático e Empírico de NI e KARACABEYLI

Os modelos matemático e empírico de NI e KARACABEYLI (2000) foram desenvolvidos para paredes sem aberturas de portas e/ou janelas, e sem dispositivos de ancoragem para prender os montantes extremos. Os modelos fornecem um fator de redução ( $\alpha$ ) a ser aplicado sobre a força máxima de uma parede semelhante, porém com ancoragem plena dos montantes extremos. A seguir é apresentado o roteiro de cálculo.

Paredes P488-pf e P488-pg (prego 2,7 x 50 anelado)

a) Modelo matemático

$\phi = 0$  (não há ancoragem da parede devido a cargas de peso próprio, sobrecarga de utilização ou ajuda da interseção de paredes de canto)

$$\gamma = \frac{H}{L} = \frac{2760}{4880} = 0,566 \quad (\text{relação altura/comprimento da parede})$$

$$\text{Fator de redução } (\alpha): \boxed{\alpha = \sqrt{1 + 2 \cdot \phi \cdot \gamma + \gamma^2} - \gamma = \sqrt{1 + 0 + 0,566^2} - 0,566 \therefore \alpha = 0,583}$$

- Força máxima estimada para as paredes P488-pf e P488-pg:

$$F_{\text{máx,est}} = 0,583 \times 39112 \quad \therefore \quad \boxed{F_{\text{máx,est}} = 22802N}$$

a) Método empírico

$\phi = 0$  (não há aplicação de carga vertical sobre a parede)

$$\text{Fator de redução } (\alpha): \boxed{\alpha = \frac{1}{1 + \frac{H}{L}} = \frac{1}{1 + \frac{2760}{4880}} \therefore \alpha = 0,639}$$

- Força máxima estimada para a parede P488-s/anc-pf:

$$F_{m\acute{a}x,est} = 0,639 \times 39112 \quad \therefore \quad \boxed{F_{m\acute{a}x,est} = 24992N}$$

### A.3 - Método de Sugiyama

A estimativa da resistência dos protótipos bem ancorados e com presença de aberturas de portas e janelas foi feita com base no método empírico de Sugiyama, que fornece um fator de redução (F) que deve ser aplicado à força máxima de uma parede semelhante, porém sem presença de aberturas. A seguir é apresentado o roteiro de cálculo, sendo a força máxima da parede sem aberturas estimada pelo modelo do Eurocode 5.

#### Parede P488-1J1P

Dimensões da abertura de porta: 900mm x 2100mm

Dimensões da abertura de janela: 1520mm x 1200mm

$$\text{Índice da Área de Aberturas } (\alpha): \alpha = \frac{A_{aberturas}}{A_{parede}} = \frac{900 \times 2100 + 1520 \times 1200}{4880 \times 2760} = 0,276$$

$$\text{Índice do Comprimento da Parede } (\beta): \beta = \frac{\sum L_i}{L} = \frac{4880 - (900 + 1520)}{4880} = 0,504$$

$$\text{Taxa de Aberturas } (r): r = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{0,276}{0,504}\right)} = 0,646$$

$$\text{Fator de Redução } (F): \boxed{F = \frac{r}{(3 - 2 \cdot r)} = \frac{0,646}{(3 - 2 \times 0,646)} = 0,378}$$

- Força máxima estimada para a parede P488-1J1P:

$$F_{m\acute{a}x,est} = 0,378 \times 39112 \quad \therefore \quad \boxed{F_{m\acute{a}x,est} = 14784N}$$

Parede P488-2J

Dimensões das aberturas de janela: 1600mm x 1500mm

$$\text{Índice da Área de Aberturas } (\alpha): \alpha = \frac{A_{aberturas}}{A_{parede}} = \frac{2 \times (1600 \times 1500)}{4880 \times 2760} = 0,356$$

$$\text{Índice do Comprimento da Parede } (\beta): \beta = \frac{\sum L_i}{L} = \frac{4880 - 2 \times 1600}{4880} = 0,344$$

$$\text{Taxa de Aberturas } (r): r = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{0,356}{0,344}\right)} = 0,491$$

$$\text{Fator de Redução } (F): F = \frac{r}{(3 - 2 \cdot r)} = \frac{0,491}{(3 - 2 \times 0,491)} = 0,243$$

- Força máxima estimada para a parede P488-2J:

$$F_{m\acute{a}x,est} = 0,243 \times 39112 \quad \therefore \quad F_{m\acute{a}x,est} = 9504N$$

## B - ESTIMATIVA DO DESLOCAMENTO DE TOPO DAS PAREDES

A estimativa do deslocamento de topo das paredes foi feita com a fórmula de cálculo da deflexão contidas nos códigos norte-americanos, conforme abordado no capítulo 3. Esta fórmula é válida para paredes bem ancoradas e sem aberturas. Este cálculo foi feito para a força correspondente a 40% da força máxima obtida em ensaio para cada parede. A seguir é apresentado o roteiro de cálculo.

### Parede P244

Dados para estimativa do deslocamento de topo para 40% da força máxima:

$v = \frac{0,40 \times 21793N}{2440mm} = 3,573N/mm$  (força por comprimento atuando no topo da parede, a partir da força máxima estimada, em N/mm)

$b = 2440mm$  (largura da parede)

$h = 2760mm$  (altura da parede)

$E = 12612MPa$  (módulo de elasticidade da madeira, em MPa)

$A = 2 \cdot (38 \times 89) = 6764mm^2$  (área da seção dos montantes extremos duplos, em  $mm^2$ )

$G_v = 1730 MPa$  (rigidez ao cisalhamento da chapa de OSB, em MPa)

$t_v = 12mm$  (espessura da chapa de fechamento, em mm)

$e_n = 1,44mm$  (deformação da ligação pregada, correspondente a 40% da força máxima alcançada no ensaio da ligação, em mm)

$d_a = \frac{0,25 + 0,73}{2} = 0,49mm$  (separação média do montante tracionado, em mm)

- Estimativa do deslocamento de topo da parede P244 para 40% da força máxima:

$$\Delta = \frac{2.v.h^3}{3.E.Ab} + \frac{v.h}{G_v.t_v} + \frac{h.e_n}{406,7} + \frac{h}{b}.d_a$$

$$\Delta = \frac{2 \times 3,573 \times 2760^3}{3 \times 12612 \times 6764 \times 2440} + \frac{3,573 \times 2760}{1730 \times 12} + \frac{2760 \times 1,44}{406,7} + \frac{2760 \times 0,49}{2440}$$

$$\Delta = 0,245 + 0,472 + 9,994 + 0,557 \therefore \Delta = 11,27 \text{ mm}$$

### Parede P244-pregoliso

Dados para estimativa do deslocamento de topo para 40% da força máxima:

$$v = \frac{0,4 \times 16979 \text{ N}}{2440 \text{ mm}} = 2,783 \text{ N/mm} \quad (\text{força por comprimento atuando no topo da parede, em N/mm})$$

$$e_n = 0,52 \text{ mm} \quad (\text{deformação da ligação pregada, em mm})$$

$$d_a = \frac{0,27 + 0,36}{2} = 0,32 \text{ mm} \quad (\text{separação média do montante tracionado, em mm})$$

- Estimativa do deslocamento de topo da parede P244-pregoliso para 40% da força máxima:

$$\Delta = \frac{2.v.h^3}{3.E.Ab} + \frac{v.h}{G_v.t_v} + \frac{h.e_n}{406,7} + \frac{h}{b}.d_a$$

$$\Delta = \frac{2 \times 2,783 \times 2760^3}{3 \times 12612 \times 6764 \times 2440} + \frac{2,783 \times 2760}{1730 \times 12} + \frac{2760 \times 0,52}{406,7} + \frac{2760 \times 0,32}{2440}$$

▪

$$\Delta = 0,191 + 0,368 + 3,609 + 0,358 \therefore \Delta = 4,53 \text{ mm}$$

Parede P366

Dados para estimativa do deslocamento de topo para 40% da força máxima:

$v = \frac{0,40 \times 33150N}{2440mm} = 3,623N/mm$  (força por comprimento atuando no topo da parede, a partir da força máxima estimada, em N/mm)

$b = 3660mm$  (largura da parede)

$h = 2760mm$  (altura da parede)

$E = 12612MPa$  (módulo de elasticidade da madeira, em MPa)

$A = 2 \cdot (38 \times 89) = 6764mm^2$  (área da seção dos montantes extremos duplos, em  $mm^2$ )

$G_v = 1730 MPa$  (rigidez ao cisalhamento da chapa de OSB, em MPa)

$t_v = 12mm$  (espessura da chapa de fechamento, em mm)

$e_n = 1,44mm$  (deformação da ligação pregada, correspondente a 40% da força máxima alcançada no ensaio da ligação, em mm)

$d_a = \frac{0,92 + 0,73}{2} = 0,83mm$  (separação média do montante tracionado, em mm)

- Estimativa do deslocamento de topo da parede P366 para 40% da força máxima:

$$\Delta = \frac{2 \cdot v \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot A \cdot b} + \frac{v \cdot h}{G_v \cdot t_v} + \frac{h \cdot e_n}{406,7} + \frac{h}{b} \cdot d_a$$

$$\Delta = \frac{2 \times 3,623 \times 2760^3}{3 \times 12612 \times 6764 \times 3660} + \frac{3,623 \times 2760}{1730 \times 12} + \frac{2760 \times 1,44}{406,7} + \frac{2760 \times 0,83}{3660}$$

$$\Delta = 0,165 + 0,479 + 9,994 + 0,626 \therefore \Delta = 11,26mm$$

Parede P488

Dados para estimativa do deslocamento de topo para 40% da força máxima:

$v = \frac{0,40 \times 43902N}{2440mm} = 3,599N/mm$  (força por comprimento atuando no topo da parede, a partir da força máxima estimada, em N/mm)

$b = 4880mm$  (largura da parede)

$h = 2760mm$  (altura da parede)

$E = 12612MPa$  (módulo de elasticidade da madeira, em MPa)

$A = 2 \cdot (38 \times 89) = 6764mm^2$  (área da seção dos montantes extremos duplos, em  $mm^2$ )

$G_v = 1730 MPa$  (rigidez ao cisalhamento da chapa de OSB, em MPa)

$t_v = 12mm$  (espessura da chapa de fechamento, em mm)

$e_n = 1,44mm$  (deformação da ligação pregada, correspondente a 40% da força máxima alcançada no ensaio da ligação, em mm)

$d_a = \frac{0,34 + 0,30}{2} = 0,32mm$  (separação média do montante tracionado, em mm)

- Estimativa do deslocamento de topo da parede P488 para 40% da força máxima:

$$\Delta = \frac{2 \cdot v \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot A \cdot b} + \frac{v \cdot h}{G_v \cdot t_v} + \frac{h \cdot e_n}{406,7} + \frac{h}{b} \cdot d_a$$

$$\Delta = \frac{2 \times 3,599 \times 2760^3}{3 \times 12612 \times 6764 \times 4880} + \frac{3,599 \times 2760}{1730 \times 12} + \frac{2760 \times 1,44}{406,7} + \frac{2760 \times 0,32}{4880}$$

$$\Delta = 0,123 + 0,476 + 9,994 + 0,182 \therefore \Delta = 10,76mm$$