

ESTUDO DE LIGAÇÕES PREGADAS EM MADEIRA NO SISTEMA LEVE PLATAFORMA

Anderson Silva

Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC. Av. João Naves de Avila, nº 2160, Bloco 1M, CEP 38400-902, Uberlândia - MG.

andersilva@triang.com.br

Domingos Alves Rade

Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC. Av. João Naves de Avila, nº 2160, Bloco 1M, CEP 38400-902, Uberlândia - MG.

domingos@ufu.br

Resumo: *O Sistema Leve Plataforma em madeira (Woodframe Platform System) é comumente utilizado nos países norte-americanos, europeus e asiáticos para a construção de edificações residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte. Ele associa as qualidades da madeira (resistência, durabilidade e economia) aos processos industrializados da construção (pré-fabricação, transporte e curto prazo de montagem). Sua estrutura é formada por peças de madeira, painéis de fechamento e ligações pregadas. As ações permanentes e sobrecargas são transmitidas à fundação de forma direta, enquanto que as ações eólicas e sísmicas são transferidas pelo comportamento diafragma da edificação. Neste artigo, apresenta-se um estudo da ligação pregada entre o quadro de madeira e o painel de fechamento. Para isto, desenvolveu-se um modelo numérico tridimensional baseado no método dos elementos finitos usando o programa computacional Ansys®. Foram consideradas a influência da direção das fibras da madeira, a não-linearidade física dos materiais, a não-linearidade geométrica do modelo e as descontinuidades geométricas por meio de elementos de contato. Os deslocamentos obtidos foram compatíveis com resultados de protótipos experimentais, tanto na direção paralela como na direção perpendicular às fibras. Desta forma, além do comportamento elástico da ligação pregada foi possível caracterizar seu mecanismo de ruptura.*

Palavras-chave: *ligações pregadas, sistema plataforma, estruturas de madeira*

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Leve Plataforma (*Woodframe Platform System*) é comumente utilizado nos países norte-americanos, europeus e asiáticos para a construção de edificações residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte. Ele associa as qualidades da madeira: resistência, durabilidade e economia, aos processos industrializados da construção: pré-fabricação, transporte e curto prazo de montagem.

No Brasil, este sistema é praticamente desconhecido e as poucas construções existentes estão localizadas nos estados da região sul. Contudo, há uma tendência nacional de sua maior participação nos setores residencial, comercial e industrial, devido à sua versatilidade arquitetônica, à sua leveza estrutural e ao avanço dos processos industrializados na construção civil.

A estrutura do sistema plataforma são peças de madeira de pequena seção transversal (montantes e banzos) revestidas com painéis de fechamento. Ela se caracteriza pela descontinuidade dos montantes de um pavimento a outro, o que permite pré-fabricação das peças e facilidade de execução e montagem dos quadros, estes com menor peso e comprimento, conforme mostra a Figura 1.

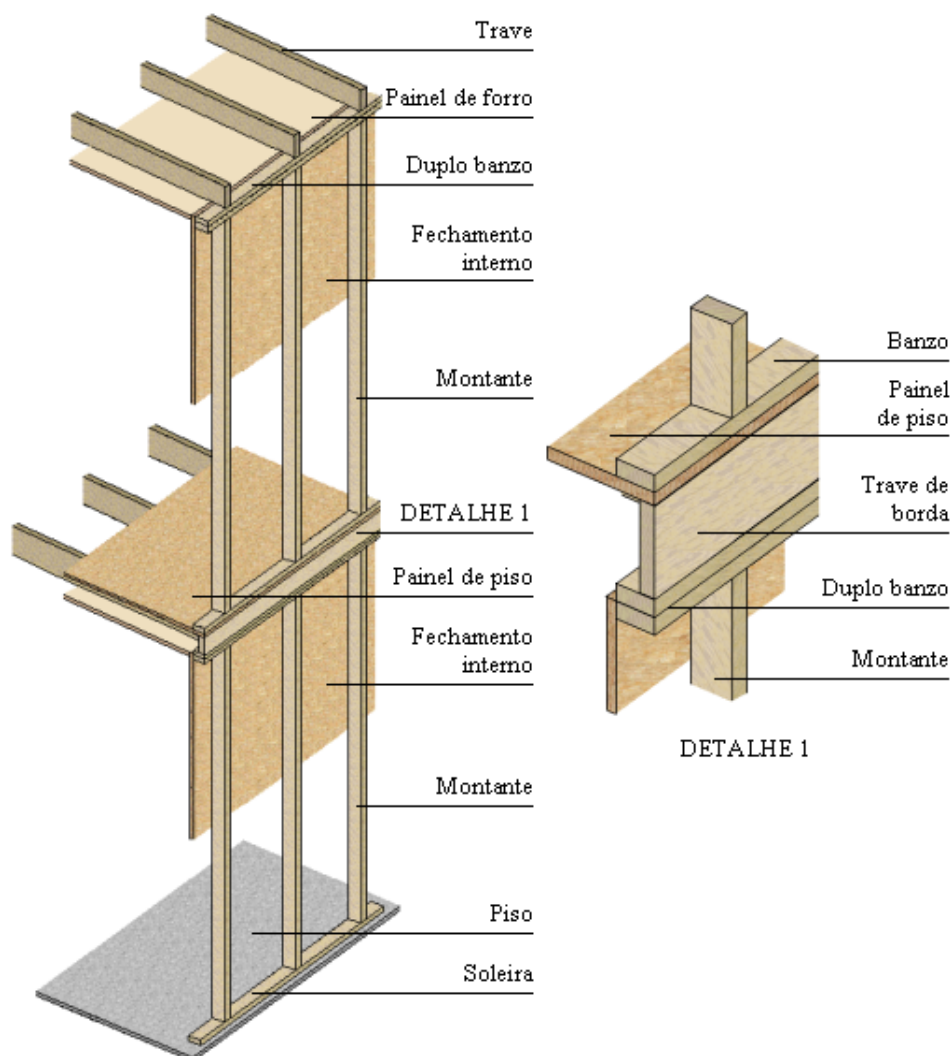


Figura 1: Estrutura do Sistema Plataforma.

O comportamento estrutural do sistema é definido pelo caminho percorrido pelas ações verticais e horizontais através dos elementos da cobertura, do piso e da parede, até o nível da fundação.

As ações verticais (peso-próprio e sobrecargas) são transmitidas à fundação pela compressão dos montantes, o que caracteriza um caminho simples e direto percorrido pelos esforços internos.

As ações horizontais (vento e terremotos, quando for o caso) são transmitidas à fundação por elementos de contraventamento chamados Diafragmas. O piso e o forro formam os Diafragmas Horizontais. As paredes formam os Diafragmas Verticais, que também são denominados Paredes Diafragma, Paredes de Cisalhamento ou, internacionalmente *Shearwalls*. Assim, as paredes em função do cisalhamento atuante em suas ligações pregadas são responsáveis pela restrição de quaisquer deformações na estrutura, conforme ilustra a Figura 2 (Veloso, 2003).

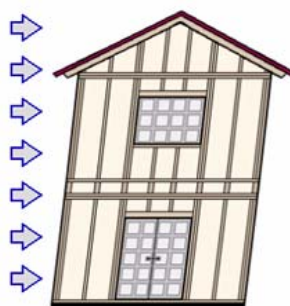


Figura 2: Possíveis deformações da edificação.

1.1 Paredes estruturais

Os elementos básicos da parede são os montantes, os banzos (inferior e superior), o painel estrutural externo, o painel interno com exclusiva função de acabamento e os pregos de ligação, conforme mostra a Figura 3.

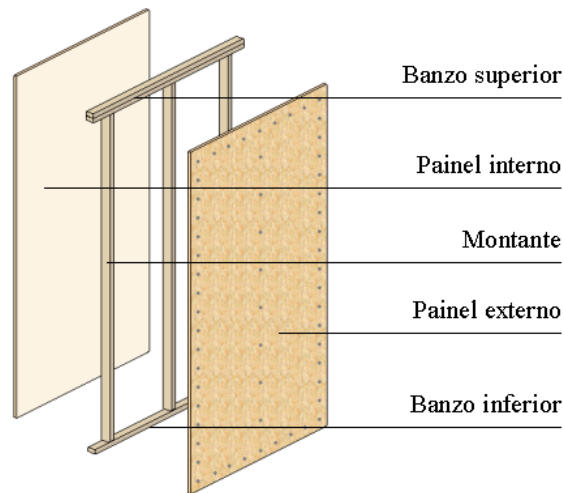


Figura 3: Elementos da parede estrutural.

Os montantes são espaçados conforme a largura dos painéis, o posicionamento das travessas de piso e das treliças de cobertura. Normalmente, são espaçados de 30, 40 ou 60 cm.

Para edificações térreas adota-se a seção 2×4 polegadas (38×89 mm) e espaçamento de 60 cm. Para edificações com dois pavimentos adota-se a mesma seção e espaçamento de 40 cm. Para edificações com três pavimentos, no piso inferior, adota-se a seção 2×6 ou 3×4 polegadas (respectivamente, 38×140 mm e 64×89 mm) e espaçamento máximo de 40 cm (Silva, 2004).

2. LIGAÇÕES PREGADAS

As ligações pregadas, como qualquer outro tipo de ligação, têm como principais requisitos resistência e rigidez, ou seja, elas devem ser resistentes à transmissão de esforços entre as peças conectadas, e suficientemente rígidas no tocante ao deslizamento entre seus componentes, visando o não comprometimento da funcionalidade da estrutura. Desta forma, o comportamento da ligação pregada é função da resistência à compressão localizada da madeira, ou seja, da resistência ao embutimento, e da resistência à flexão do prego. Assim, ambos os parâmetros definem os mecanismos de ruptura das ligações pregadas (Almeida, 1987).

2.1 Resistência à compressão localizada

A resistência à compressão localizada ou resistência de embutimento da madeira é determinada em ensaio padronizado da NBR 7190 (1997). Mas, na ausência de determinação experimental específica, a norma estabelece a resistência de cálculo de embutimento paralelo às fibras (f_{e0}) e perpendicular às fibras (f_{e90}) pelas Equações 1 e 2.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (1)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot \alpha_e \cdot f_{c0} \quad (2)$$

onde f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras da madeira e α_e é o coeficiente de embutimento da madeira fornecido pela NBR 7190 (1997) em função do diâmetro do prego.

Para direções intermediárias de θ (entre 0° e 90°), a resistência ao embutimento $f_{e\theta}$ é relacionada empiricamente pela fórmula de Hankinson, dada pela Equação 3.

$$f_{e\theta} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \sin(\theta)^2 + f_{e90} \cdot \cos(\theta)^2} \quad (3)$$

2.2 Mecanismos de ruptura

Os mecanismos de ruptura das ligações envolvem, como já antecipado, o esmagamento localizado por compressão das peças de madeira e a plastificação por flexão de uma ou mais seções do pino. Em geral, os mecanismos são classificados nos tipos I, II, III e IV, conforme a Figura 4.

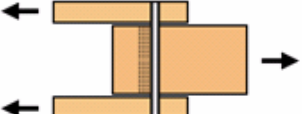
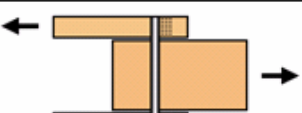
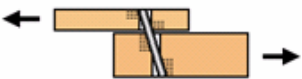
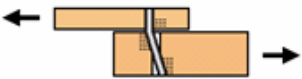
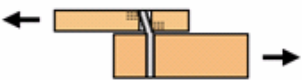
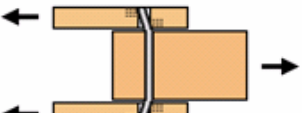
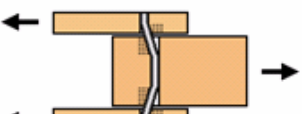
Mecanismo	Corte simples	Corte duplo
Tipo I: esmagamento da madeira (sem rotação do pino)		
		
Tipo II: esmagamento da madeira (com rotação do pino)		Inexistente devido à simetria da ligação
Tipo III: esmagamento da madeira e plastificação do pino (1 rótula plástica)		Inexistente devido à simetria da ligação
		
Tipo IV: esmagamento da madeira e plastificação do pino (2 rótulas plásticas)		

Figura 4: Mecanismos de ruptura das ligações.

Os mecanismos I e II são parciais, envolvem apenas o esmagamento da madeira, sem ou com a rotação do pino. Os mecanismos III e IV são completos, envolvem tanto o esmagamento da madeira como a plastificação do pino. A ocorrência de um ou outro depende, além dos materiais utilizados, da geometria da ligação, sendo também função da espessura das peças.

3. MODELO NUMÉRICO

As ligações pregadas são estudadas normalmente por meio de ensaios experimentais em razão do grande número de variáveis que influenciam no seu comportamento, conforme anunciam os trabalhos de Almeira (1987), Stamato (2002), Veloso (2003), Dias (2005) e Santos (2005).

Desta forma, em razão das poucas pesquisas realizadas a partir de modelos numéricos, citando o trabalho Stamato (2002), desenvolveu-se neste trabalho um modelo numérico tridimensional, baseado no método dos elementos finitos usando o programa computacional Ansys®, com o objetivo de investigar o comportamento estrutural das ligações pregadas em suas fases elástica, plástica e de ruptura (estados limites de utilização e últimos), conforme ilustram as Figuras 5 e 6. Para sua validação, foram considerados os dados experimentais de Dias (2005) e Santos (2005).

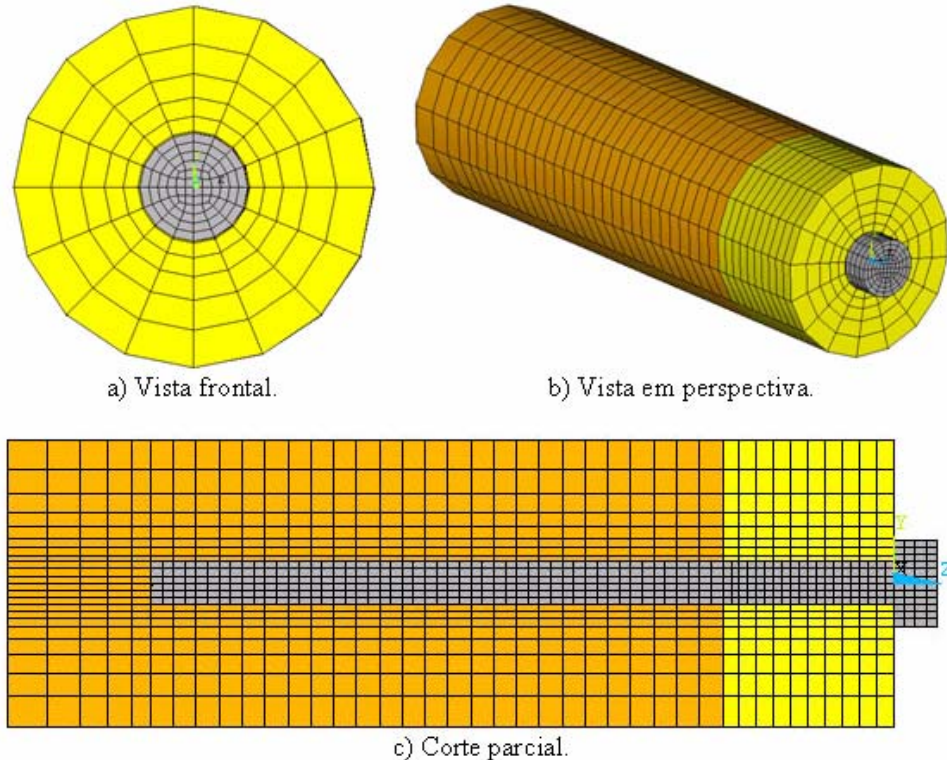


Figura 5: Modelo numérico da ligação pregada.

Foram considerados na modelagem: a direção das fibras da madeira, o atrito entre os materiais, a tensão de ruptura da madeira e do painel, a tensão de escoamento do prego, as condições de contorno adequadas para uma análise localizada da ligação, ou seja, sem influência de efeitos estruturais externos, e a não-linearidade geométrica do modelo, ou seja, a presença de grandes deslocamentos na fase plástica e de ruptura.

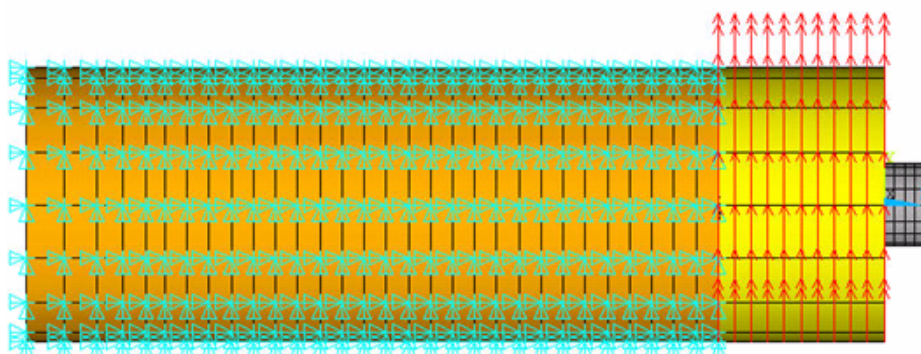


Figura 6: Condição de contorno e carregamento aplicado no modelo.

O contato foi implementado para as discontinuidades geométricas: prego-madeira, prego-painel e painel-madeira. Neste caso, os sólidos somente se inter-relacionam quando a superfície de contato interfere na superfície alvo, ou seja, quando há esforços de compressão. Os pares de contato foram definidos por elementos 2D do Ansys® Target170 e Contact173 (quatro nós com três graus de liberdade por nó, translação em X, Y e Z).

3.1 Madeira

A madeira pinus foi discretizada como material ortotrópico pelo elemento 3D do Ansys® Solid45 (oito nós com três graus de liberdade por nó, translação em X, Y e Z). Suas propriedades mecânicas foram definidas segundo a NBR 7190 (1997) e as relações simplificadas de Bodig e Jayne (1982), conforme as Equações 4 a 12.

$$E_L = E_{c0} = 10.000 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção longitudinal às fibras)} \quad (4)$$

$$E_R = \frac{1,6}{20} \cdot E_L = 800 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção radial às fibras)} \quad (5)$$

$$E_T = \frac{1}{20} \cdot E_L = 500 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção tangencial às fibras)} \quad (6)$$

$$G_{LR} = \frac{1}{14} \cdot E_L = 714 \text{ MPa (módulo de cisalhamento no plano longitudinal-radial)} \quad (7)$$

$$G_{LT} = \frac{9,4}{140} \cdot E_L = 671 \text{ MPa (módulo de cisalhamento no plano longitudinal-tangencial)} \quad (8)$$

$$G_{RT} = \frac{1}{140} \cdot E_L = 71 \text{ MPa (módulo de cisalhamento no plano radial-tangencial)} \quad (9)$$

$$\nu_{RL} = 0,37 \text{ (coeficiente de Poisson no plano radial-longitudinal às fibras)} \quad (10)$$

$$\nu_{TL} = 0,42 \text{ (coeficiente de Poisson no plano tangencial-longitudinal às fibras)} \quad (11)$$

$$\nu_{TR} = 0,47 \text{ (coeficiente de Poisson no plano tangencial-radial às fibras)} \quad (12)$$

A ruptura foi condicionada à compressão localizada no furo, ou seja, à resistência ao embutimento da madeira. Os diagramas tensão×deformação da madeira utilizados estão representados na Figura 7.

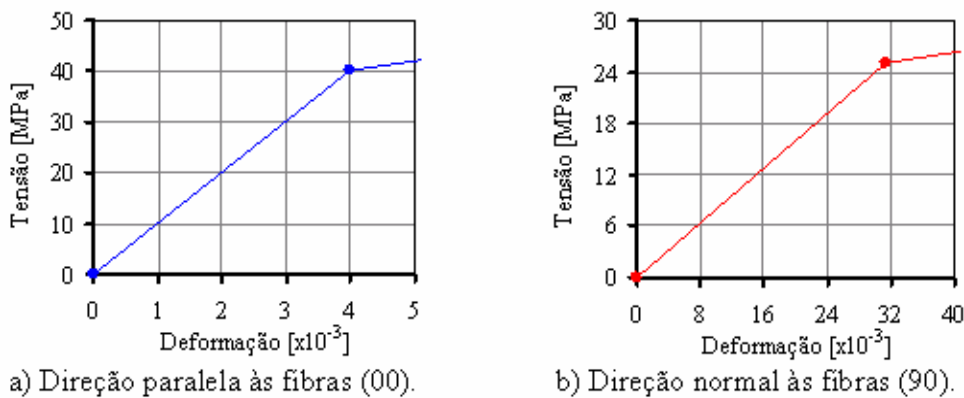


Figura 7: Diagramas tensão×deformação da madeira.

3.2 Painei

O painel de fechamento *osb* foi discretizado como material ortotrópico pelo elemento 3D do Ansys® Solid45. Suas propriedades mecânicas foram definidas segundo relações simplificadas, conforme as Equações 13 a 18.

$$E_1 = 5.000 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção paralela às fibras do painel)} \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot E_1 = 2.500 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras)} \quad (14)$$

$$E_3 = \frac{1}{20} \cdot E_1 = 250 \text{ MPa (módulo de elasticidade na direção normal ao painel)} \quad (15)$$

$$G_{12} = \frac{7}{20} \cdot E_1 = 1.750 \text{ MPa (módulo de cisalhamento no plano do painel)} \quad (16)$$

$$G_{13} = G_{23} = \frac{1}{100} \cdot E_1 = 50 \text{ MPa (módulo de cisalhamento normal ao painel)} \quad (17)$$

$$\nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{32} = 0,42 \text{ (coeficiente de Poisson do painel)} \quad (18)$$

A ruptura foi condicionada à resistência ao embutimento do painel, conforme mostra a Figura 8.

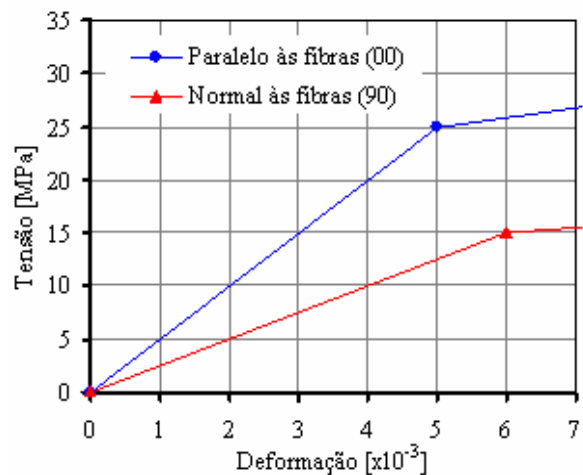


Figura 8: Diagramas tensão×deformação do painel.

3.3 Prego comum

O prego utilizado tem 2,7 mm de diâmetro e 55 mm de comprimento (comercialmente: 16×24). Ele foi discretizado com elemento Solid45 e como material isotrópico bilinear, ou seja, dois segmentos de retas consecutivos que caracterizam a não-linearidade física do material. Suas propriedades mecânicas foram definidas segundo Almeida (1987), conforme as Equações 19 a 21.

$$E = 180.000 \text{ MPa (módulo de elasticidade do aço)} \quad (19)$$

$$\nu = 0,30 \text{ (coeficiente de Poisson do aço)} \quad (20)$$

$$f_y = 700 \text{ MPa (tensão de escoamento do aço)} \quad (21)$$

4. RESULTADOS

O diagrama da força aplicada em função do deslocamento da ligação é apresentado na Figura 9, considerando os resultados experimentais de Dias (2005), Santos (2005) e os resultados numéricos obtidos neste trabalho. Na Figura 10 é visualizado o mecanismo de ruptura da ligação.

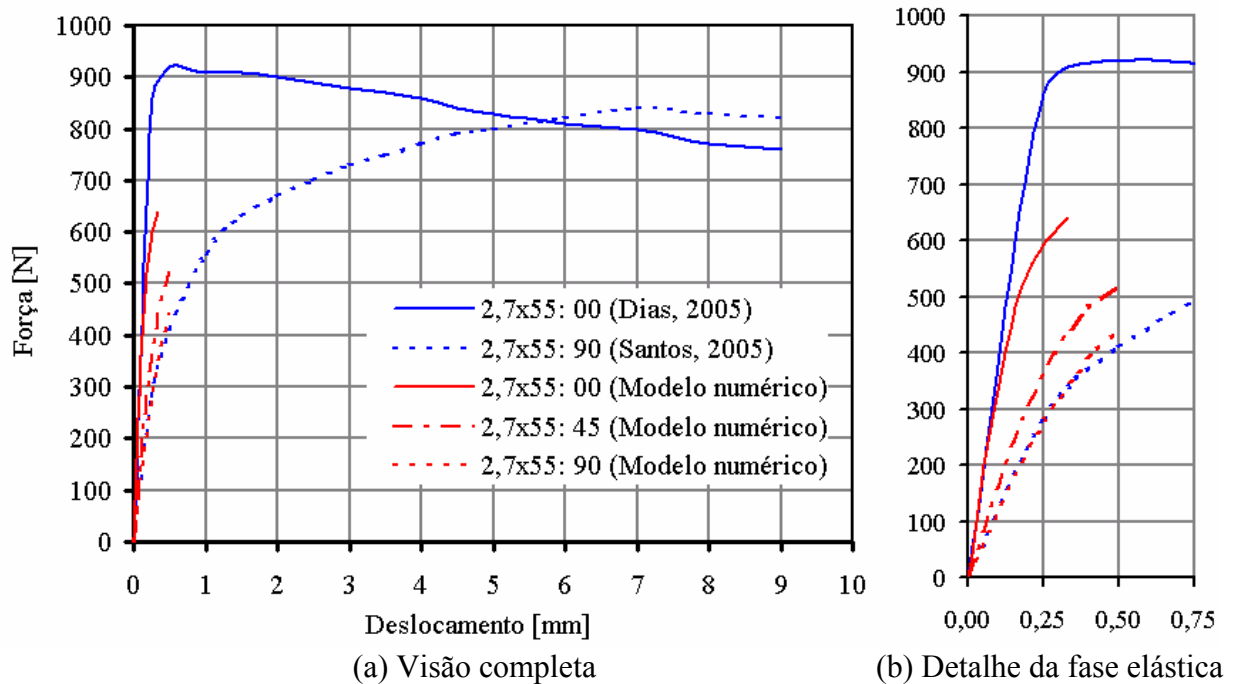


Figura 9: Diagrama força×deslocamento da ligação pregada.

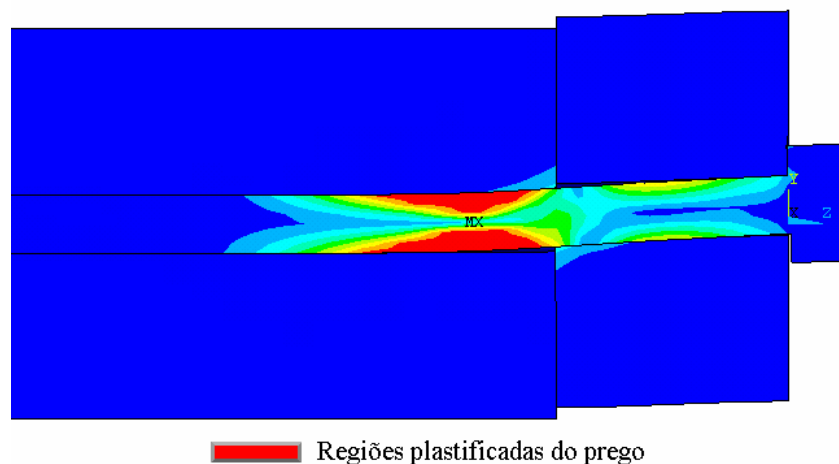


Figura 10: Visualização do mecanismo de ruptura da ligação.

Na Figura 9 verifica-se na fase elástica uma similaridade entre os resultados experimentais e numéricos, tanto na direção paralela como na direção perpendicular às fibras. Entretanto, na fase plástica, nota-se que o modelo numérico apresentou uma ruptura prematura para a força aplicada paralelamente às fibras. Este fato motiva a realização de estudos complementares.

Na Figura 10 observa-se a plastificação do prego e as compressões localizadas na borda superior da madeira e na borda inferior do painel, caracterizando o início dos mecanismos de ruptura III e IV da ligação (veja Figura 4).

5. CONCLUSÕES

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho baseado no método dos elementos finitos apresentou deslocamentos compatíveis com os protótipos ensaiados por Dias (2005) e Santos (2005), por isto, é uma ferramenta eficaz na análise do comportamento das ligações pregadas, principalmente, na determinação de sua rigidez na fase elástica.

Todavia, ainda são objetivos de maior estudo: a condição de contorno utilizada e os parâmetros impostos para os elementos de contato. Além disto, nas etapas subseqüentes da pesquisa serão investigadas: a simetria da estrutura, a influência do refinamento da malha e a sensibilidade das variáveis do problema, visando à redução do tempo de processamento para o estudo de confiabilidade estrutural. Isto, a fim de verificar, comparar e calibrar, se necessário, os coeficientes de ponderação aplicados pela norma NBR 7190 (1997) a este tipo de ligação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia - UFU, à Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC e ao CNPq pelo apoio.

7. REFERÊNCIAS

- Almeida, P.A.O., 1987, “Uniões pregadas de madeira”, Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.
- Bodig, J. and Jayne, B.A., 1982, “Mechanics of wood and wood composites”, New York: Van Nostrand Reinhold Company (VNRC).
- Dias, G.L., 2005, “Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (Sistema plataforma) submetidas à força horizontal no seu plano”, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- NBR 7190, 1997, “Projeto de estruturas de madeira”, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Santos, A.C., 2005, “Pisos em sistemas leves de madeira sob ação de carregamento monotônico em seu plano”, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Silva, A., 2004, “Comportamento diafragma de paredes de madeira no sistema leve plataforma”, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia.
- Stamato, G.C., 2002, “Ligações em estruturas de madeira composta por chapas de madeira”, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Veloso, L.A.C.M., 2003, “Paredes diafragma de madeira”, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.

STUDY OF NAILED FASTENERS IN WOODFRAME PLATFORM SYSTEM

Anderson Silva

Federal University of Uberlândia - UFU, School of Mechanical Engineering - FEMEC. Av. João Naves de Avila, nº 2160, Bloco 1M, CEP 38400-902, Uberlândia - MG.
andersilva@triang.com.br

Domingos Alves Rade

Federal University of Uberlândia - UFU, School of Mechanical Engineering - FEMEC. Av. João Naves de Avila, nº 2160, Bloco 1M, CEP 38400-902, Uberlândia - MG.
domingos@ufu.br

Abstract: *Wooden platform systems are widely employed in North America, Europe and Asia in the construction of small and medium-size residential buildings. It associates timber's qualities (strength, durability and cost-effectiveness) to the processes building's industrials (fabrication, transport and assembling speed). Its structures is formed by wooden pieces, panels sheathing and nailed fasteners. The dead and live actions are transmitted directly to the foundation, while the winds and seismic actions are transmitted through diaphragmatic behavior of the building. This paper presents a study of nailed fasteners between wooden pieces and panel sheathing. For this, it was developed a tri-dimensional numeric model based on the Finite Element Method (FEM) using software Ansys[®]. Were considered the influence of the wooden fibers direction, materials' physical nonlinearity, model's geometric nonlinearity and geometrics discontinues by using contact elements. The displacements obtained were found to be in good agreement with those obtained experimentaly from prototypes tested in normal and perpendicular directions with respect to the wooden fibers. Thus, elastic behavior of the nailed fasteners and failure mechanism were characterized.*

Keywords: *nails fasteners, platform system, timber structures*