

## **ESTRUTURAS RETICULADAS DE MADEIRA COM CONEXÕES SEMI-RÍGIDAS**

Cláudia Lúcia de Oliveira Santana<sup>1</sup>; Nilson Tadeu Mascia<sup>1</sup> \*

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP, Brasil.

\* e-mail do autor correspondente: [ntm@unicamp.com](mailto:ntm@unicamp.com)

**Resumo:** Em estruturas de madeira, uma grande variedade de arranjos estruturais pode ser construída com base no conceito de peças de ligação. A análise estrutural de sistemas estruturais de madeira tem acompanhado o progressivo entendimento sobre o comportamento das ligações. No entanto, os métodos estruturais clássicos não consideram a deformação das ligações e seus efeitos não são amplamente conhecidos. A análise de estruturas em pórtico com ligações semirrígidas tem duas vertentes: o modelo estrutural e o modelo de comportamento da ligação. Neste trabalho, apresenta-se uma análise paramétrica de estruturas reticuladas de madeira com ligações semirrígidas com comportamento geral não linear, nas quais as propriedades das ligações são variadas e seus efeitos em diferentes estruturas são observados. Os resultados mostram que a resposta estrutural é afetada em diferentes graus pelos parâmetros de ligação, dependendo também da geometria da estrutura.

**Palavras-chave:** Estruturas reticuladas; madeira; ligações semirrígidas; análise matricial

### **WOOD FRAMED STRUCTURES WITH SEMI-RIGID CONNECTIONS**

**Abstract:** Structural analysis of wood structural systems has followed the progressive understanding about the connections behavior. However, classical structural methods do not consider the deformation of the connections and its effects are not widely known. The analysis of framed structures with semi-rigid connections has two aspects: the structural model and the connection behavior model. In this work, a parametric analysis of wood framed structures with semi-rigid connections is presented with general nonlinear behavior, in which the connection properties are varied and their effects on different structures are observed. The results show that the structural response is affected in different extents by the connection parameters, also depending on the structure geometry.

**Keywords:** Framed structures; wood; semi-rigid connections; matrix analysis

## 1. INTRODUÇÃO

A contribuição da deformação de ligações no comportamento de estruturas tem sido objeto de preocupação, uma vez que resultados experimentais mostraram sua importância. As teorias sobre conexões semirrígidas acompanharam o desenvolvimento da análise matricial de estruturas reticuladas. Com o avanço dos programas comerciais de análise de elementos finitos, o método mais natural para computar a contribuição da deformação de ligações é por meio de elementos de ligações. O método para o cálculo da deformação da ligação é um dos aspectos da análise de estruturas em pórticos com ligações semirrígidas. O aspecto explicitamente relacionado ao material é a descrição do comportamento dos elementos de ligação, considerando-se a relação entre os deslocamentos nodais e as forças. Para estruturas de madeira, trabalhos foram feitos por [1] e [2], dentre outros.

O processo de elaboração de um projeto pode levar a diferentes ligações com diferentes efeitos na estrutura, tanto no sentido quantitativo quanto qualitativo, dependendo respectivamente da rigidez e da geometria da estrutura. Pode-se esperar que o projeto ótimo de estruturas esteja em grande parte relacionado ao projeto da conexão. Neste trabalho, usa-se uma análise paramétrica variando o comportamento do momento resistente da ligação para analisar os efeitos das propriedades da ligação na resposta da estrutura.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Modelo estrutural e método de solução

A análise de 1ª ordem de estruturas reticuladas tem fundamentos no Princípio do Trabalho Virtual (PTV). A análise não linear incluindo deformações das ligações é baseada na mesma teoria, exceto pela contribuição das ligações estar incluída no domínio, via elementos de ligações (Figura 1).

O trabalho virtual interno devido às deformações das barras é calculado via simplificações da teoria clássica da flexão, e a aplicação do PTV a um elemento de barra genérico leva a:

(1)

Sendo  $\mathbf{K}_b^e$  a rigidez do elemento de barra,  $\mathbf{u}_b^e$  e  $\mathbf{a}_b^e$  são, respectivamente, os deslocamentos nodais e as forças nodais nas extremidades da barra [3]. O trabalho virtual interno devido a deformações nas conexões é calculado por meio de simplificações na descrição das tensões e deformações internas, de tal forma que a aplicação do PTV a um elemento de conexão genérico conduz a:

(2)

onde  $\mathbf{f}^c$  é um vetor com funções não lineares de  $\mathbf{u}^c$  e  $\mathbf{a}^c$  e são, respectivamente, os deslocamentos nodais e as forças nodais nas extremidades das conexões.

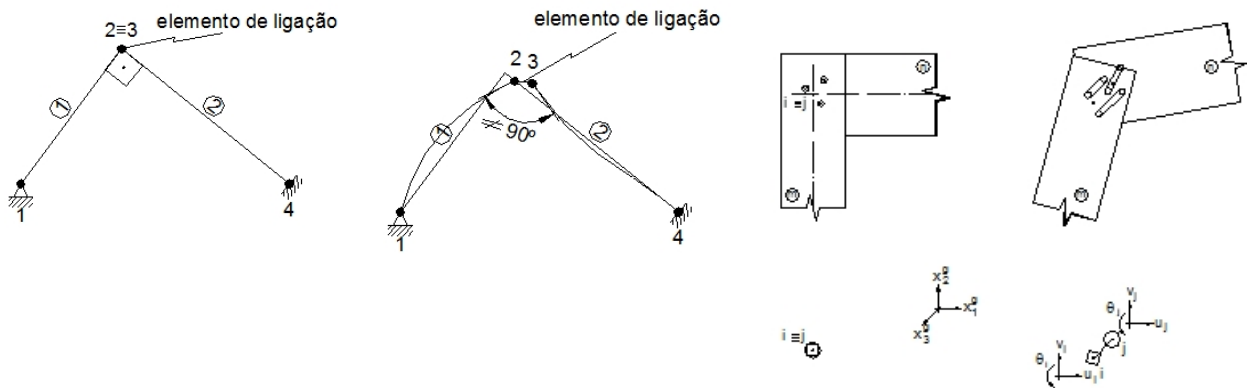


Figura 1: Elemento de ligação (pontos 2 e 3) e detalhe de sua configuração deformada

As Equações 1 e Equação 2 podem ser montadas em uma equação global equivalente à equação de PTV. A linearização prévia da Equação 2 pode ser realizada por meio do método de Newton-Raphson, e a seguinte equação recursiva é obtida:

(3)

onde o índice  $k$  é o número da interação, e a rigidez é função de:

(4)

## 2.2 Relação entre forças e deslocamentos nos conectores

A relação entre cargas nodais e deslocamentos para os elementos de ligação pode ser desenvolvida comumente por um procedimento experimental ou de um método teórico aproximado. De acordo com o segundo, assume-se que as forças nodais são estaticamente equivalentes ao conjunto de forças atuantes em cada conector ( $F_p$ ) e os deslocamentos nodais cinematicamente equivalentes ao escorregamento de cada conector ( $\Delta_p$ ). O trabalho virtual das forças sobre os deslocamentos relativos virtuais dos conectores é teoricamente considerado equivalente ao trabalho virtual das tensões sobre as deformações virtuais no volume de conexão. A força em um conector está relacionada aos deslocamentos relativos no conector por meio de uma relação não linear da Equação 5, com  $C_{i,\alpha}$  parâmetros obtidos experimentalmente e  $\alpha$  a inclinação arbitrada, originalmente proposta por [4]:

(5)

Com:

(6)

Com essas bases, a relação dada pela Equação 2 pode ser desenvolvida. A construção da

forma funcional do comportamento das conexões de acordo com esses princípios foi feita por [3].

### 2.3 Análise Paramétrica

A análise consistiu em projetar uma estrutura com dimensões típicas para uso comercial, variando entre  $L=8,0$  e  $16,0$  m. Inicialmente, a estrutura foi projetada para forças características determinadas de acordo com a teoria clássica. Os esforços momento (M), normal (N) e cortante (V), mostrados qualitativamente na Figura 2, foram utilizados para o dimensionamento das ligações. A rigidez inicial das ligações e os parâmetros que definem seu comportamento são determinados. Em seguida, a análise de cada estrutura foi repetida segundo o modelo descrito anteriormente. A análise paramétrica envolveu a atribuição de diferentes ligações para a mesma demanda de resistência, e a consideração de comportamento não linear e linear aproximado para as ligações.

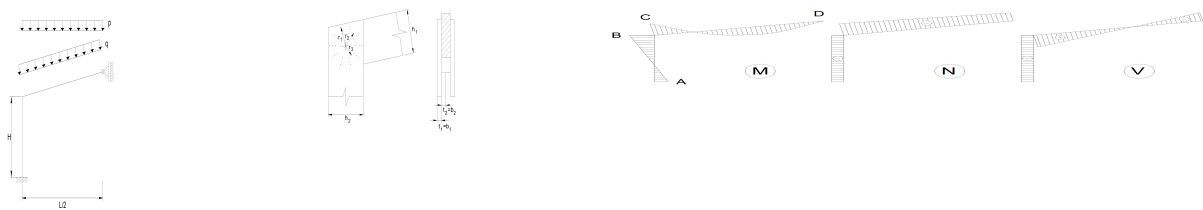


Figura 2: Exemplo de estrutura com conexões utilizadas na análise. Diagramas típicos de esforços internos.

Os parâmetros usuais de projeto são a rigidez inicial e a resistência das conexões. As normas técnicas são fundamentadas no comportamento linear das conexões. Para fins de análise, as conexões podem ser realmente não lineares antes do valor limite de resistência, conforme as Equação 5 e Equação 6. Assim, os parâmetros de projeto são  $C_{1,0,d}$ ,  $C_{2,0,d}$ ,  $C_{3,0,d}$ ,  $C_{1,90,d}$ ,  $C_{2,90,d}$  e  $C_{3,90,d}$ , que podem ser obtidos a partir de testes de um conector individual nas direções paralela e perpendicular em relação às fibras. O único parâmetro considerado na análise linear é a rigidez dos conectores, tomada como a rigidez inicial do comportamento não linear correspondente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alguns resultados desta análise estão listados na Tabela 1. O primeiro número de cada linha é o resultado da análise não linear e o segundo, da análise linear. Os valores entre parênteses são os desvios da análise em relação às conexões rígidas.

A partir desses resultados, a análise linear traz resultados muito próximos aos obtidos com a análise não linear, com grandes desvios para os deslocamentos. Os resultados são dependentes dos

parâmetros dos conectores e da rigidez inicial global da conexão ( $K_{M,ini}$ ). Ao comparar os resultados rígidos e semirrígidos, os deslocamentos são significativamente afetados, assim como a distribuição dos momentos fletores. Por outro lado, as forças não são muito afetadas.

Tabela 1: Esforços e deslocamentos de acordo com os parâmetros de rigidez.

	$K_{M,ini}$ (kNcm/rad)	$M_A$ (kNcm)	$V_C$ (kN)	$\theta_{AB}$ (rad)	$M_C$ (kNcm)	$u_C$ (cm)
L=8.0m	$\infty$	982	7,96	0	-1213	-0,1344
	441780	1303 ( <b>33%</b> )	7,76 (-3%)	1,8496	-1090 (-10%)	-0,2940 ( <b>119%</b> )
		1444 ( <b>47%</b> )	7,67 (-4%)	1,5264	-1128 (-7%)	-0,2659 ( <b>98%</b> )
	625422 (42%>anterior)	1213 ( <b>24%</b> ) 1289 ( <b>31%</b> )	7,81 (-2%) 7,77 (-2%)	1,0999 1,2848	-1,113 (-8%) -1152 (-5%)	-0,2455 ( <b>83%</b> ) -0,2294 ( <b>71%</b> )
L=16.0m	$\infty$	4423	17,88	0	-5070	-0,2488
	2126140	5780 ( <b>31%</b> )	17,38 (-3%)	1,2371	-4468 (-12%)	-0,4994 ( <b>101%</b> )
		6347 ( <b>43%</b> )	17,17 (-4%)	1,6620	-4645 (-8%)	-0,4354 ( <b>75%</b> )
	2366820 (11%>anterior)	5652 ( <b>28%</b> ) 6083 ( <b>38%</b> )	17,42 (-3%) 17,27 (-3%)	1,3651 1,4684	-4550 (-10%) -4685 (-8%)	-0,4704 ( <b>89%</b> ) -0,4546 ( <b>83%</b> )

$K_{M,ini}$  é a rigidez inicial global,  $M_A$  e  $M_C$  momentos fletores nos pontos A e C,  $V_C$  cortante no ponto C,  $\theta_{AB}$  giro relativo entre a e B,  $u_C$  deslocamento em C.

#### 4. CONCLUSÕES

Estruturas com ligações semirrígidas podem ser analisadas pelo método matricial, amplamente disponível em programas comerciais de análise de elementos finitos. A análise linear pode ser razoavelmente utilizada para o dimensionamento de ligações semirrígidas, de acordo com um comportamento linear ou bilinear das ligações. Apesar disso, a análise não linear se aplica à modelagem do comportamento real das ligações. De qualquer forma, o efeito da deformação das ligações é significativo, principalmente para deslocamentos e distribuição de momentos. O projeto e a otimização da estrutura dependem principalmente de um equilíbrio entre a resistência e a rigidez da ligação fundada em seu efeito sobre os elementos da barra.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] Santana, C. L.O.; Mascia, N.T. Analysis of wooden framed structures with semi-rigid connections. In: 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014, Barcelona. E-book. Barcelona: CMINE. 2014; v.II: 1437-1444
- [2] Minjuan, H; Jing, L; Duo,T.; Zheng,L.; Li, Yongliang,,S.; Guirong,H. Rotational behavior of bolted glulam beam-to-column connections with knee brace, Engineering Structures. 2020; 207: 110251. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110251>.
- [3] Santana, C. L. O. Análise não linear de pórticos planos de madeira com ligações semi-rígidas.2002. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

[4] Foschi, R. Load-Slip Characteristics of Nails. Wood Science. 1974;7 (1): 69-76.