

Proposta de modelo de cálculo para peças comprimidas de madeira composta

Ricardo de Carvalho Alvim¹; Luis Augusto Conte Mendes Veloso²; Rosana de Albuquerque
Arléo Alvim³, Pedro Afonso de Oliveira Almeida⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma nova metodologia de cálculo de peças de madeira composta, levando em conta resultados experimentais de modo a calibrar expressões de projeto, rigidez e resistência, sob ação de carregamentos de compressão. O módulo de deslizamento das ligações foi considerado com base em curvas experimentais, para estabelecer um fator de redução da rigidez para pilares compostos, como função do número e diâmetro dos pinos (pregos ou parafusos). Isso resultou, em alguns casos, em um fator de redução da rigidez diferente do modelo da Norma Brasileira. O modelo proposto indica resultados mais realistas e seguros, para algumas situações de projeto.

Palavras-chave: Madeira. Seção composta. Rigidez efetiva. Peças comprimidas.

¹ Professor Titular, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilheus, Brasil, rcalvim@uesc.br

² Professor Adjunto, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, lveloso@ufpa.br

³ Professor Assistente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilheus, Brasil, raalvim@uesc.br

⁴ Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, palmeida@usp.br

1 Introdução

A Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Madeira – ABNT NBR 7190, em seu capítulo sobre peças compostas, trata as peças solidarizadas descontinuamente por blocos espaçadores ou chapas laterais como peças maciças equivalentes, cuja rigidez efetiva é obtida pela redução da rigidez nominal por meio de um coeficiente redutor, que considera, principalmente, o afastamento geométrico das peças que compõe a seção. Este coeficiente redutor, β_l , considera também, além da geometria da seção, o aspecto material da ligação por meio de um coeficiente denominado α_y .

O modelo de peças compostas da Norma Brasileira é baseado no Código Modelo Europeu EC5 – Eurocode 5. O EC5 é bastante conciso no que tange à rigidez efetiva dessas peças, resultando em um modelo simplificado de cálculo, mas que não prevê algumas situações de projeto para as ligações, em especial, quando envolve a relação entre o número de pinos e a rigidez das ligações.

As madeiras no Brasil são predominantemente mais densas, com resistências caracterísitcas da ordem de 60 MPa. O emprego dessas madeiras em seções compostas exige pinos de maior resistência como os pregos, com valor médio da ordem de 800 MPa. A utilização de pregos nas ligações leva a arranjos com maior quantidade de pinos, em virtude de seus pequenos diâmetros. A tarefa de calcular a quantidade ideal de pregos é fundamental no projeto de peças de seção composta, seja por economia ou por questões construtivas.

Nesta proposta, duas situações importantes de projeto das peças compostas são tratadas: a rigidez efetiva das peças e a rigidez das ligações, variável em função do número de pinos e outros parâmetros geométricos.

2 Arranjo típico das peças de seção composta

As peças de seção composta, em geral, são formadas por ligações pregadas, ou por ligações aparafusadas, ou por anéis e chapas metálicas, conforme ilustrado no exemplo do pilar de seção composta da Figura 1.

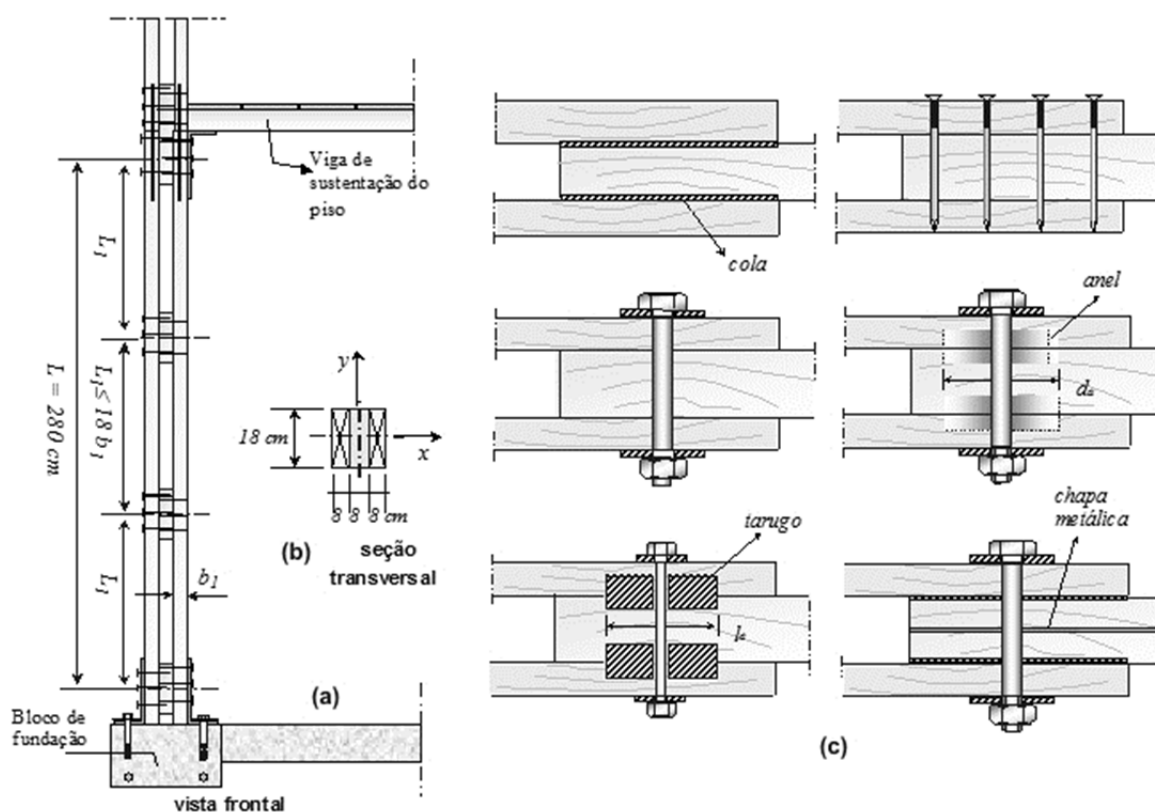


Figura 1: Exemplo de pilar com seção composta

As ligações entre as peças justapostas são limitadas ao tamanho dos blocos espaçadores ou das chapas laterais. No caso das ligações com pinos metálicos, pregos ou parafusos, o espaço entre pinos respeita ainda a tendência de fissuração da madeira durante a cravação dos pregos, em especial nas madeiras de maior resistência. Para evitar tal fissuração, estabelece-se uma distância mínima entre pinos especificada por regras construtivas, normalizadas.

3 Modelo de cálculo de peças de seção composta

A resistência das peças comprimidas é determinada em função da deformabilidade transversal de seu eixo, que pode ser expressada em diferentes níveis de aproximação. Portanto, o equilíbrio da seção depende da configuração deformada da peça, que pode ser determinada por qualquer um dos métodos de cálculo que levam em conta os efeitos de segunda ordem.

No caso das peças de madeira com seção composta, de esbeltez intermediária, onde se considera apenas a não linearidade geométrica, a deformabilidade está diretamente relacionada aos tipos de ligação entre as peças longitudinais, que podem ou não considerar o deslizamento entre as

interfaces de ligação. No método de Pleshkov (1952), apud Alvim (2002), a resistência de um pilar composto é fortemente relacionada com o tipo de ligação entre os elementos longitudinais, expressada pelo módulo de deslizamento.

3.1 Módulo de Deslizamento da Ligação

No modelo proposto, a rigidez efetiva depende do espaçamento equivalente entre blocos espaçadores ao longo do comprimento do pilar, s_{ef} , que é dado, para o exemplo ilustrado na Figura 1, por:

$$s_{ef} = \frac{L_1}{n_p} = \frac{93,3}{5} = 18,66 \text{ cm} \quad (1)$$

Onde L_1 é a distância entre o centro dos espaçadores e n_p é o número de pinos por seção a corte duplo. O valor da rigidez efetiva da ligação, que estima o deslizamento entre as peças, é proposto a partir do módulo de deslizamento obtido pela aplicação do modelo de vigas sobre fundações elásticas, cujo resultado pode ser resumido conforme o ábaco da Figura 2 para diferentes diâmetros de pregos.

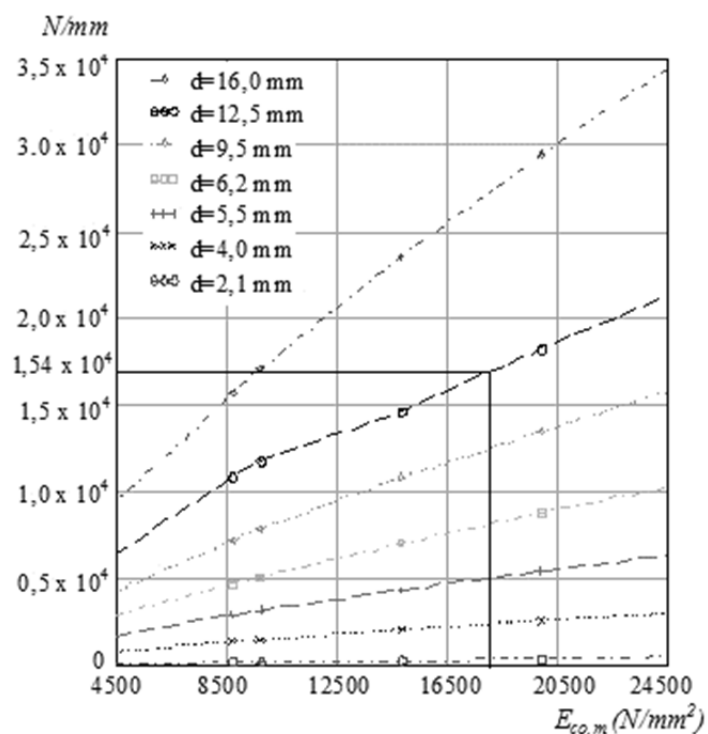


Figura 2: Módulo de deslizamento da ligação pregada em função do módulo de elasticidade da madeira, Alvim (2002)

O valor do módulo de deslizamento obtido do ábaco da Figura 2, para o exemplo, é de:
 $k = 1,54 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$.

O módulo de deslizamento também pode ser obtido por outras expressões que relacionam propriedades afins da rigidez das ligações, por exemplo, no EC 5 o módulo de deslizamento em regime de serviço (k_{ser}) pode ser calculado por:

$$k_{ser} = \rho_k^{1,5} \frac{d}{20} = 1000^{1,5} \frac{12,5}{20} = 1,97 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (2)$$

Onde ρ_k é a densidade aparente da madeira. O valor do módulo de deslizamento último, neste caso, é estimado no EC 5 por:

$$k_u = \frac{2}{3} k_{ser} = \frac{2}{3} \cdot 1,97 \times 10^4 = 1,31 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (3)$$

3.2 Coeficientes de redução da rigidez

A redução da rigidez pode então ser calculada por meio de dois coeficientes adimensionais, ν e μ , que aplicados ao exemplo, são dados por:

$$\nu = \frac{\pi^2 \cdot E_{coef} \cdot A_r \cdot s_{ef}}{m_c \cdot L^2 \cdot k} = \frac{\pi^2 \cdot 1,715 \times 10^6 \cdot 288 \cdot 18,66}{3 \cdot 280^2 \cdot 1,54 \times 10^5} = 2,51 \quad (4)$$

Onde m_c é o número de ligações entre camadas de peças interligadas e A_r é a área das peças individuais.

Por sua vez, μ é dado por:

$$\mu = \frac{\pi^2 \cdot l_c^3}{24 \cdot \frac{I_2}{I_y} \cdot L_1 \cdot L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 66,7^3}{24 \cdot \frac{768}{19968} \cdot 93,3 \cdot 280^2} = 0,43 \quad (5)$$

Onde o comprimento reduzido l_c é dado por:

$$l_c = \frac{L - 4 \cdot l_b}{m} = \frac{280 - 4 \cdot 20}{3} = 66,7 \text{ cm} \quad (6)$$

Onde l_b é a comprimento dos blocos espaçadores e m é o número de intervalos entre espaçadores. Finalmente, o valor do coeficiente de redução da rigidez da peça é:

$$\beta_I = \frac{1 + \alpha(\mu + \nu)}{1 + \nu + \mu} = \frac{1 + (2I_2/I_y)(\mu + \nu)}{1 + \nu + \mu} = \frac{1 + (2 \cdot 768/19968)(0,43 + 2,51)}{1 + 2,51 + 0,43} = 0,31 \quad (7)$$

Este valor é 47% superior ao valor fornecido pela ABNT NBR 7190:1997.

4 Investigações experimentais

4.1 Investigaçãonumérica

A investigação experimentalnumérica foi baseada no Método do Carregamento Incremental. Neste método, a carga crítica é obtida por meio do cálculo das deformações do pilar, considerando-se tanto a não linearidade geométrica do sistema quanto a resistência à compressão do material. O processo consiste em considerar um pilar carregado excentricamente e aplicar-lhe incrementos progressivos de carga, ΔF_i , até o aparecimento de um estado limite último, quando for atingida a resistência à compressão paralela às fibras do material. Considerando-se uma carga inicial próxima a zero, em cada etapa de carregamento, $F_i + \Delta F_i$, calcula-se a deformada do pilar de uma seção transversal de referência, Figura 3.

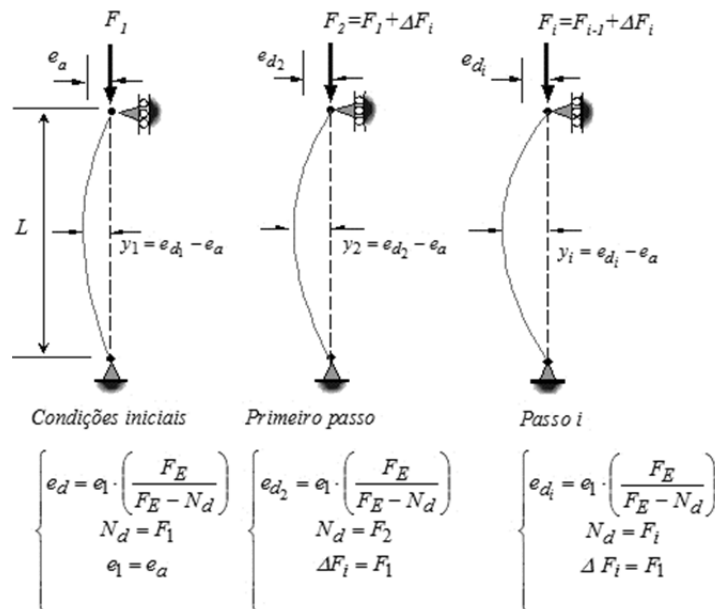


Figura 3: Método do Carregamento Iterativo

O processo é iterativo e o carregamento crítico é obtido por meio do valor F_i para o qual o diagrama carga-deslocamento tende assintoticamente, Figura 4, caracterizando o fenômeno de

instabilidade elástica. Este procedimento é conduzido até que o material se torne incapaz de resistir às tensões de flexocompressão, atingindo a ruptura.

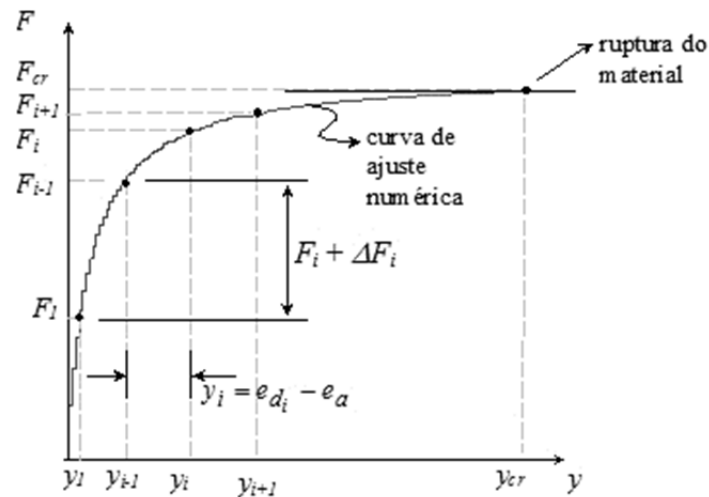


Figura 4:Força em função dos descolamentos horizontais

Para determinação da carga de ruptura da peça, considera-se o efeito combinado das tensões decorrentes da ação das forças normais mais aquelas relacionadas aos momentos fletores da seção nominal da peça, em que comparece a interação parcial dos componentes. Isto pode ser representado por uma inequação de verificação, ABNT NBR 7190 (1997), dada pela Equação 8:

$$\frac{N_d}{2 \cdot A_1} + \frac{M_d \cdot I_2}{W_2 \cdot I_{ef}} + \frac{M_d}{2 \cdot a_1 \cdot A_1} \left[1 - \frac{2 \cdot I_2}{I_{ef}} \right] \leq f_{c,0,d} \quad (8)$$

4.2 Ensaios

Para avaliar a resistência dos pilares, foram realizados ensaios estáticos de compressão, onde foram variados o número de blocos espaçadores, suas espessuras e o número de pinos nas ligações. Na Figura 5a, é possível observar um pilar típico durante o ensaio de compressão. Na Figura 5b, a curva de força em função do deslocamento, além do detalhe dos aparelhos de apoio empregados, mostrados na Figura 5c.

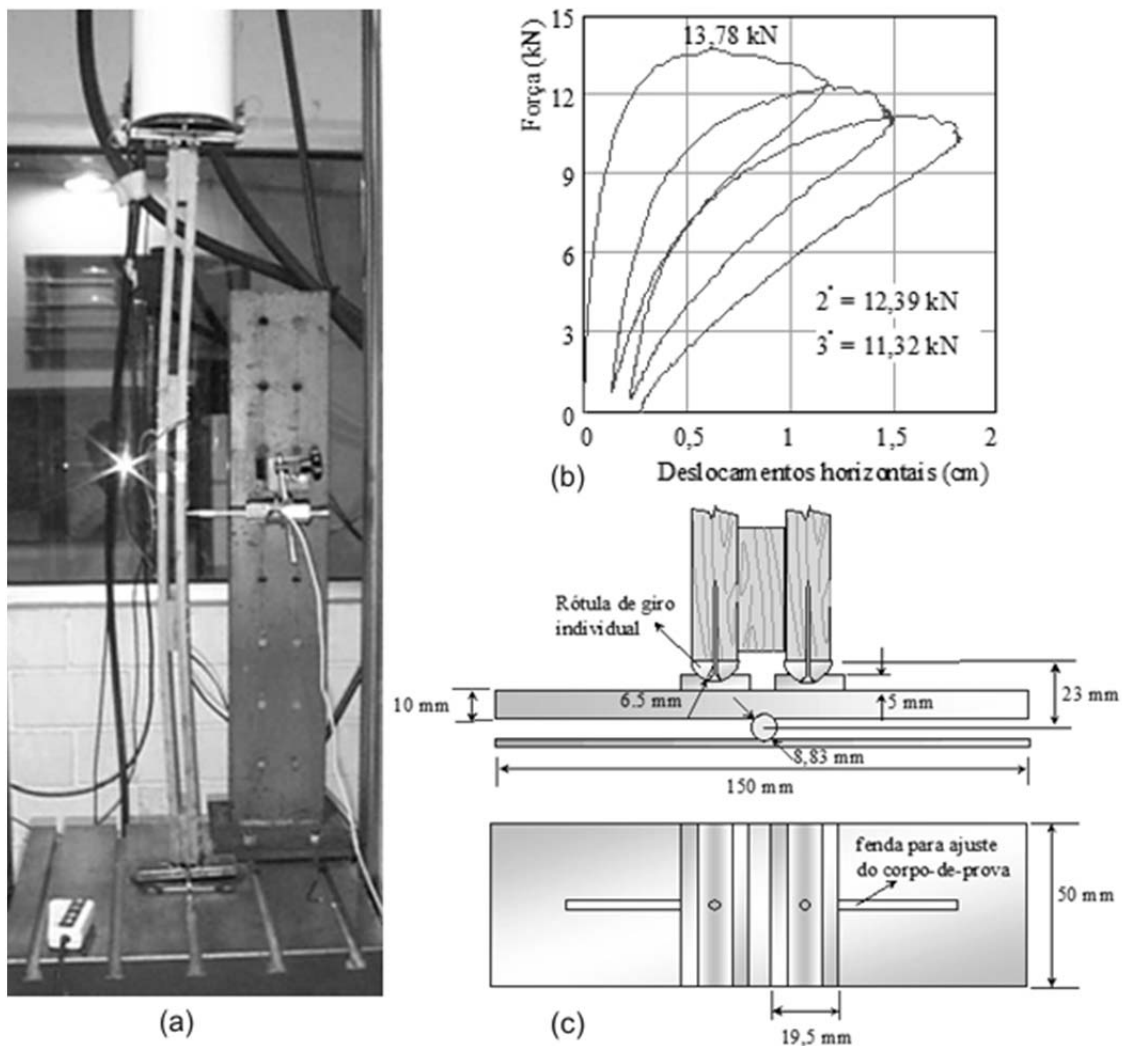


Figura 5:Ensaio de pilar em andamento e detalhes dos aparelhos de apoio

5 Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios permitiram ajustar as curvas experimentais numéricas com a calibração do coeficiente β_I de redução da rigidez efetiva. Dentre as inúmeras soluções possíveis, representadas pela região de ajuste da Figura 6a, encontra-se a que melhor aproxima os resultados experimentais. Para esta curva, ficam definidos de forma aproximada a rigidez efetiva do pilar composto e a excentricidade experimental e_a .

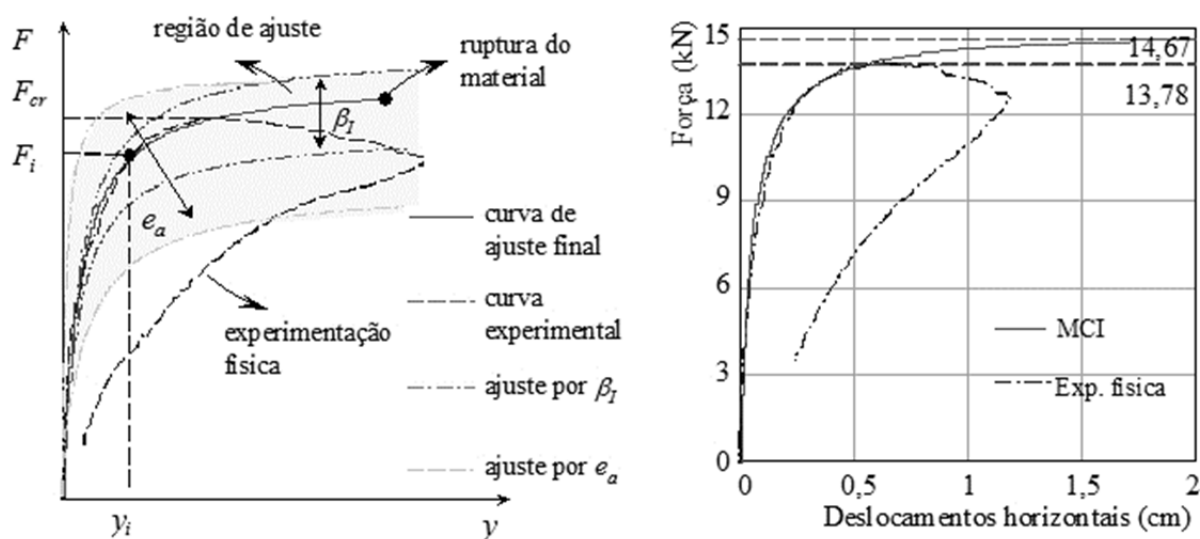


Figura 6: Curvas obtidas experimentalmente. (a) Ajuste experimental dos coeficientes de redução da rigidez. (b) Curvas de força em função do deslocamento experimentais

O modelo apresentado, ao levar em conta a rigidez efetiva da peça por meio do módulo de deslizamento da ligação, conduz a valores superiores ao da ABNT NBR 7190:97, Figura 7.

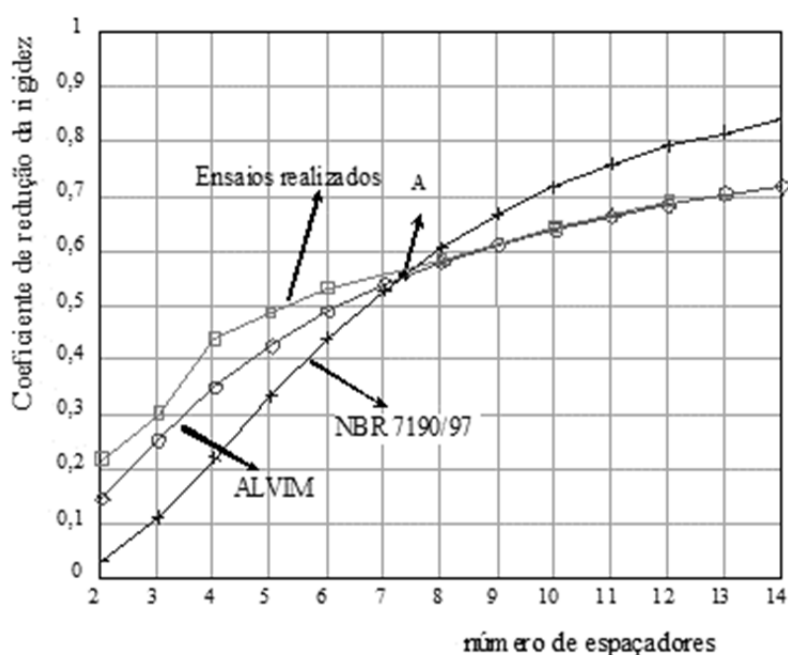


Figura 7: Resultados experimentais

Quando consideradas as investigações experimentais realizadas os resultados se mostram mais realistas. Considerar as resistências calculadas a partir da ABNT NBR 7190:1997 como seguras, por serem inferiores às experimentais é, todavia, prematuro. Extensões dessa análise,

numérica e experimentalmente permitiram concluir que em alguns casos a ABNT NBR 7190:1997 pode apresentar resultados contra a segurança para peças com mais de sete blocos espaçadores, Figura 7.

Para o caso do pilar da Figura 1, aplicando o Método do Carregamento Incremental chega-se a um valor de carga de projeto da ordem de 302 kN, enquanto que aplicando o modelo da ABNT NBR 7190:97, o valor é de 255 kN.

6 Conclusões

Quando considerados os resultados experimentais obtidos, o modelo analítico proposto de cálculo é mais realista do que o da ABNT NBR 7190:1997. A rigidez efetiva das peças compostas foi ajustada por meio do Método do Carregamento Incremental e dos ensaios realizados, resultando expressões de projeto calibradas. Em algumas situações de projeto, o uso das expressões da ABNT NBR 7190:1997 pode conduzir a resultados contra a segurança.

7 Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. (1997). Projeto de Estruturas de Madeiras – NBR 7190. Rio de Janeiro: ABNT.
- ALMEIDA, P. A. O. (1990). Estruturas de Grande Porte de Madeira Composta. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ALVIM, R.C. (2002). A Resistência dos Pilares de Madeira Composta. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP.
- EUROCODE 5. (1993). Common Unified Rules for Timber Structures, part 1-1 General Rules and Rules for Buildings. CEN Commission of the European Communities. Luxembourg.
- PLESKOV, P. F. (1952). Theoretical Studies of Composite Wood Structures, Moscow, 192 pp.

A DESIGN MODEL FOR TIMBER BUILT-UP COLUMNS

Abstract

This paper presents the design of build-up columns based in a new theoretical model, taking in consideration experimental results, in order to calibrate design expression, stiffness and strength, under compression loads. The connections slip was taken in consideration based experimental curves, to establish a stiffness reduction factor for spaced columns, as a function of the number and diameter of the connectors (nails or bolts). This resulted, in some cases, in a reduction factor different when compared with Brazilian Code model. The proposed model indicates to more realistic and safer results, for some design situations.

Keywords: Wood.Composed sections. Effective stiffness. Compressed members.

1 Introduction

The Brazilian Standard Code for Design of Wood Structures, in his chapter on composite parts, in the section relative to spacer blocks composed members, uses an equivalent effective stiffness which is obtained by reduction coefficients, calculated taking in consideration geometric spacing of the pieces and built-up the section. The Brazilian Standard Code is based on European Eurocode 5. The EC5 is very concise when it comes to effective stiffness of such members, resulting in a simplified model calculation, especially when involved the relationship between the number of connectors and stiffness of the connections.

The number of connectors, in addition to their arrangement, can influence the strength of the member and the effective stiffness of the connections. Therefore, the ideal amount of nails is fundamental in the design of composite members, either for economy or issues constructively. Moreover, the increase of the number of connections will not necessarily lead to increased resistance.

In this proposed model, two major issues of design are treated: the effective stiffness and rigidity the connections, which may vary depending on the number of connectors, and other geometric parameters.

2 Compressed Composed Members Calculation Model

In the proposed model, the stiffness reduction coefficients are given by:

$$\beta_I = \frac{1 + (2I_2/I_y)(\mu + \nu)}{1 + \nu + \mu} \quad (1)$$

In this expression the ν e μ coefficients are calculated by some geometrical and mechanical properties of the composed member, which includes the connection slip factor.

3 Experimental results

The experimental program included the use of numerical computational routines, such as the Incremental Loading Method, and compression tests in reduced scale specimens in order to calibrate the stiffness reduction coefficients. The method consists in adjust the experimental curve by tentative, searching for the real values of the load eccentricity and effective stiffness of the composed columns. In the experimental programs the number and the width of the spacer blocks were considered.

4 Conclusions

When considered the experimental results, the proposed analytical calculation model is more realistic than the Brazilian Code. The effective stiffness of the composed members was adjusted by the Incremental Loading Method and the performed experimental tests, resulting in calibrated design expressions. In some design situations, the Brazilian Code may lead to unsafe results.