

PARAFUSOS OCOS EM LIGAÇÕES DE PEÇAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Cynara Fiedler Bremer, UFMG, E-mail: cynarafiedlerbremer@ufmg.br
Edgar Carrasco, UFMG, E-mail: mantilla@dees.ufmg.br

Resumo: Este estudo trata da análise experimental de ligações estruturais com parafusos ocios em peças de eucalipto laminado colado submetidas a esforços combinados de momento fletor e força cortante. As características mecânicas das lâminas que compunham as peças foram determinadas através de ensaios não destrutivos via ultrassom. As peças de madeira laminada colada foram confeccionadas de modo a se obter um resultado satisfatório. Os corpos de prova foram confeccionados a partir de duas peças de madeira laminada colada unidas com diversos conectores, em forma de L (com o objetivo de se simular uma ligação viga-pilar), carregadas e levadas até a ruptura. Na região da ligação foram instalados transdutores nas posições horizontal e vertical (com o objetivo da determinação do giro entre as peças ao longo de todo o ensaio), a carga foi aplicada através de um conjunto de atuador hidráulico e bomba de pressão, e sua leitura foi feita através de uma célula de carga. Todos os dados foram obtidos de forma automatizada, armazenados e tratados num sistema de aquisição de dados. Foram elaborados gráficos Momento x Rotação da ligação para cada um dos tipos de ligação analisados, determinando desta maneira o desempenho da ligação e a resistência rotacional.

Palavras-chave: Ligações em madeira, Esforços combinados, Análise Experimental.

HOLLOW SCREWS CONNECTIONS IN GLULAM PIECES

Abstract: This study deals with an experimental analysis of structural hollow screws connections in Glued Laminated Eucalyptus pieces under bending moment and shearing force combined efforts. Wood mechanical properties were analyzed through nondestructive ultrasound tests. The laminated wooden pieces were carefully made in order to obtain satisfactory results. Specimens were made of two wooden pieces in L form (to simulate a beam-column connection), loaded until rupture. At the connection region two displacement transducers were installed, one in horizontal position and the other in vertical position (to determine the rotation between the wooden pieces). All data were recorded in an appropriated acquisition data system. Moment x rotation connection curves for each analyzed connection were plotted, determining each connection performance and rotational resistance.

Keywords: Wooden connections, Combined Efforts, Experimental Evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Um tema bastante presente nos dias de hoje é a sustentabilidade. O uso da palavra é aplicado às vezes fora do seu real significado, com o objetivo de realçar apenas um dos seus focos. Assim, há a perda da totalidade de uma palavra simples, mas ao mesmo tempo tão abrangente. O conceito de sustentabilidade é derivado do debate sobre o desenvolvimento sustentável, cujo marco inicial é a primeira Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano (*United Nations Conference on the Human Environment*), realizada em 1972 em Estocolmo. A definição mais utilizada foi cunhada em 1987 pela Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Comissão Brundtland.

Pode-se dizer que desenvolvimento sustentável é o tipo de desenvolvimento que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades. A atual sociedade enfrenta a necessidade de dar resposta a uma exigência social que tem grandes implicações no nosso sistema produtivo, em particular no setor dos materiais de construção. A incorporação de práticas de sustentabilidade na construção é uma tendência crescente no mercado, pois diferentes agentes (governos, consumidores, investidores e associações) alertam, estimulam e pressionam o setor da

construção a incorporar essas práticas em suas atividades. Para tanto, o setor da construção precisa se modernizar e se adaptar às novas tendências, levando para o canteiro de obras, para o escritório de projetos e também para o usuário final o conceito e as aplicações da sustentabilidade. Essas soluções são traduzidas nos materiais, métodos construtivos, soluções de projeto, aproveitamento de resíduos, reciclagem, entre outras tantas.

O uso de materiais ambientalmente corretos pode ter como solução um novo material, que seja resistente, livre de toxicidades ou até mesmo um material já conhecido pelo setor, mas com um novo uso, com uma nova aplicação. Dentre os muitos materiais disponíveis tem-se a madeira, que é um material renovável, resistente, que consome gás carbônico e libera oxigênio na atmosfera. Se suas peças forem deslocadas por pequenas distâncias constituem uma solução sustentável, de baixa energia incorporada e baixo impacto ambiental. Para que as madeiras de lei não sejam extintas são utilizadas na indústria as madeiras de reflorestamento, como o *pinus* e o *eucalipto*, árvores de rápido crescimento.

A madeira pode ter sua aplicação potencializada se for usada a técnica de laminação. Tal técnica consiste em utilizar lâminas de pequena espessura (até 5 cm), que são coladas com um adesivo estrutural, formando uma peça multicamadas. Uma das vantagens desta técnica é poder usar madeiras de diferentes espécies (e conseqüentemente várias resistências) numa mesma peça. Conforme a solicitação a que for ser submetida é possível distribuir convenientemente, ao longo da altura e do comprimento as lâminas menos resistentes onde as solicitações forem menores e as lâminas mais resistentes onde estas forem maiores. As vantagens principais deste material são a redução das imperfeições em comparação à mesma peça de madeira maciça, além de permitir a produção de maneira viável e econômica de componentes estruturais (RODD, P. D & GUAN, Z.W.). Estas lâminas podem ser provenientes de restos de fabricação de outras peças e há inúmeras aplicações da madeira laminada colada (MLC): vigas, arcos, pontes, treliças, etc, Figura 1.



Figura 1 – Peças de MLC

Fonte: <http://madeiralaminadacolada.com>

Para que sejam realizadas as ligações entre peças de madeira comumente são utilizados os seguintes elementos: parafusos, pregos anéis e adesivos. Estes elementos presentes na ligação têm a função de transmitir os esforços de uma peça à outra, devendo eles próprios também resistir a esses esforços. Muitas vezes os elementos de ligação possuem resistência superior à resistência das peças que estão sendo ligadas. Uma ligação eficiente deve ser, além de resistente, dúctil. A ductilidade é uma propriedade importante para que haja absorção de energia no caso de colapso (MURTH, B. & SMITH, I.), propriedade que pode ser aumentada usando parafusos ocos ao invés de parafusos maciços (RODD, P. D & GUAN, Z.W.).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo traz como solução inovadora para os elementos de ligação em peças de MLC o uso de *parafusos ocos* (tubos galvanizados), ao invés de parafusos tradicionais. Tal escolha se justificou, além da ductilidade esperada na ligação, o fato de menos material ser utilizado na sua confecção. Estes elementos podem ser, ainda, reciclados e transformados em novos parafusos ocos. Foram analisados três diâmetros de tubos: ½”, ¾” e 1”. Para simular a ligação de uma viga com um pilar foram realizados ensaios com modelos em forma de L, com os parafusos ocos servindo de ligação entre os dois elementos. Neste tipo de ensaio houve a presença de força cortante e momento fletor atuando no conjunto, que girou. Além destes ensaios foram realizados também ensaios de embutimento, que têm como objetivo analisar o comportamento do pino (neste caso, o parafuso oco) na peça de madeira, quando uma força de compressão atua no modelo. A partir dos resultados dos dois tipos de ensaio o conector adotado pôde ser avaliado.

Além do foco na ligação a madeira adotada foi o *Eucalypto Grandis*, madeira de reflorestamento, que tem incentivo do governo brasileiro para uso voltado à sustentabilidade. Para que as peças tivessem maior resistência optou-se pela técnica do laminado colado, pelos motivos explicitados anteriormente. Com o objetivo de determinação da resistência das lâminas foi utilizado um aparelho de ultrassom, um tipo de ensaio não destrutivo.

As características mecânicas das lâminas que compunham tais peças foram determinadas através de ensaios não destrutivos via ultrassom, Figura 2. O ensaio consiste em colocar em uma das extremidades da peça de madeira em análise a fonte que emite a onda e na outra extremidade o receptor. Conforme o teor de umidade presente na amostra e a própria natureza da madeira, a onda terá maior ou menor velocidade de propagação no interior da peça. De posse deste valor suas características (módulo de elasticidade e a resistência da madeira na direção de propagação da onda) são determinadas.



Figura 2 – Ensaio não destrutivo via ultrassom

Depois de determinadas as resistências das lâminas passou-se à etapa de colagem. Depois de coladas todas as lâminas o conjunto foi levado a uma prensa que ofereceu uma pressão constante, para a cura do adesivo, Figura 3.



Figura 3 – Sequência da aplicação do adesivo nas lâminas e colocação do conjunto sob a prensa

Os parafusos ocos foram confeccionados a partir de tubos galvanizados com 6 m de comprimento. Para compor a ligação foram adotados tubos galvanizados com três diâmetros diferentes: $\frac{1}{2}$ ” (12,7mm), $\frac{3}{4}$ ” (19,05mm) e 1” (25,4mm). Estes tubos foram cortados de acordo com as dimensões dos corpos de prova, que foram divididos em três séries: série A (diâmetro de $\frac{1}{2}$ ”), B (diâmetro de $\frac{3}{4}$ ”) e C (diâmetro de 1”). Os tubos foram cortados em tubos menores e receberam roscas dos dois lados, Figura 4.



Figura 4 – Corte e roscas nas extremidades dos tubos

Os corpos de prova foram então cortados de acordo com as dimensões calculadas previamente. Foram feitos furos na região da ligação para alojarem os tubos. De cada lado do corpo-de-prova foi colocada uma chapa de ligação de aço, em seguida, alojados os tubos e posicionadas as arruelas. Cada luva foi cortada ao meio, funcionando como uma porca de cada lado. Em seguida os corpos de prova, em forma de L, já prontos com seus conectores instalados, tiveram suas rótulas parafusadas nas suas extremidades, Figura 5.

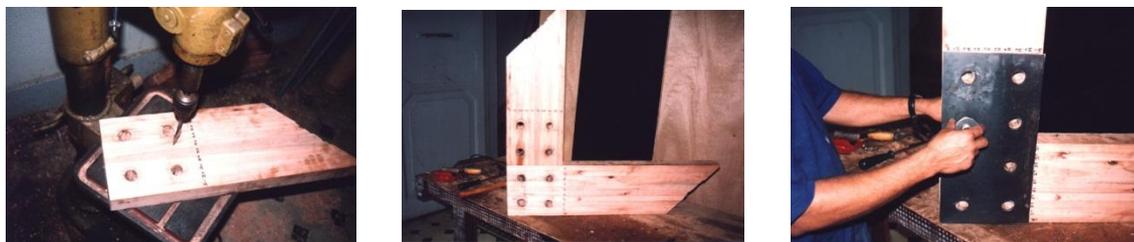
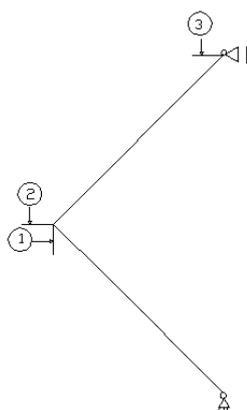


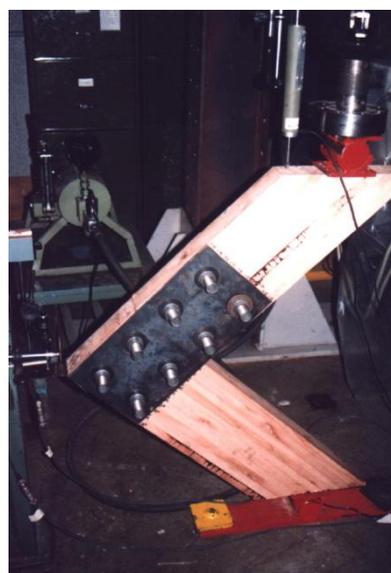


Figura 5 – Preparação da ligação e montagem do corpo-de-prova em forma de L

Os corpos-de-prova foram ensaiados conforme esquema da Figura 6, com dois apoios: um apoio articulado móvel no ponto de aplicação de carga e outro articulado fixo na região do apoio. Na região da ligação foram colocados dois transdutores de deslocamento, um na posição horizontal e outro na posição vertical. Um terceiro transdutor foi colocado na região de aplicação de carga. Tais transdutores foram instalados com o objetivo de se medir o giro da ligação quando a carga atuasse, Figura 7.



(a) Posicionamento dos transdutores de deslocamento – Esquemático



(b) Posicionamento dos transdutores de deslocamento - Físico

Figura 6 – Esquema do ensaio com os apoios articulados

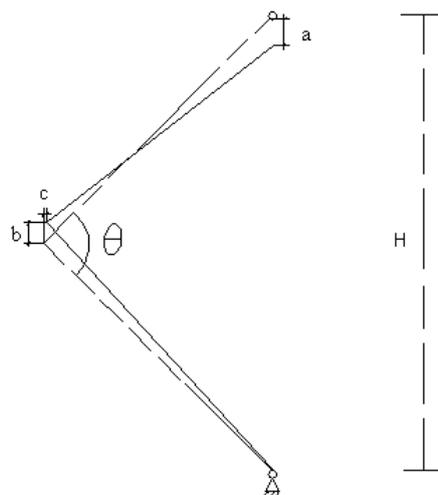


Figura 7 – Transdutores para o cálculo do giro

Depois de ensaiado cada corpo-de-prova (das séries A, B e C) foi cortado, originando dois corpos-de-prova menores, que foram ensaiados para determinar também a sua resistência ao embutimento (normal e paralelo às fibras). Foram instalados dois transdutores de deslocamento, um de cada lado do corpo-de-prova, Figura 8, para medir os deslocamentos causados a cada incremento de carga.

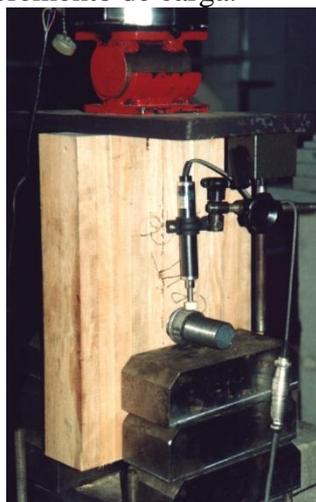


Figura 8 – Detalhes dos corpos de prova de embutimento (paralelo e normal às fibras)

Por definição (NBR7190/1997) “A resistência de embutimento é definida pela razão entre a força que causa a deformação específica residual de 2‰ e a área de embutimento do pino”.

Os carregamentos aplicados nos corpos de prova em todos os ensaios (flexão e embutimento) foram do tipo cíclico, obedecendo às prescrições da NBR7190 (1997) e todos os dados oriundos dos ensaios foram armazenados num sistema de aquisição de dados apropriado, para posterior análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada lâmina do corpo-de-prova tinha suas características físicas e mecânicas próprias. No ensaio com o aparelho de ultrassom foi determinado o módulo de elasticidade de cada uma destas lâminas. Para que cada corpo-de-prova tivesse um único valor de módulo de elasticidade como parâmetro, foi necessária uma homogeneização dos módulos de elasticidade da seção. Para tal recurso foi utilizada a Equação 1.

$$E_h = \frac{\sum_i^n E_i \cdot I_i}{I} \tag{1}$$

onde: E_h é o módulo de elasticidade homogeneizado da peça, dado em MPa;

E_i é o módulo de elasticidade da lâmina i , em MPa;

I_i é o momento de inércia da lâmina i em relação à posição da linha neutra da seção transversal, em m^4 ;

I é o momento de inércia da peça, em m^4 ;

n é o número de lâminas.

Os resultados dos módulos de elasticidade homogeneizados para as séries A, B e C encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Módulos de elasticidade (em MPa) homogeneizados para os corpos de prova das séries A, B e C

Corpo-de-prova	Série A	Série B	Série C
CPI	-	11405	22780
CPII	16403	10855	23816
CPIII	17432	8974	28727
CPIV	19017	23412	21544
CPV	14023	7657	27482
CPVI	22512	30825	18722
Média	17877	15521	23845

Foram traçados gráficos momento x rotação para cada corpo-de-prova de cada série (A, B e C), Figuras 9 a 11.

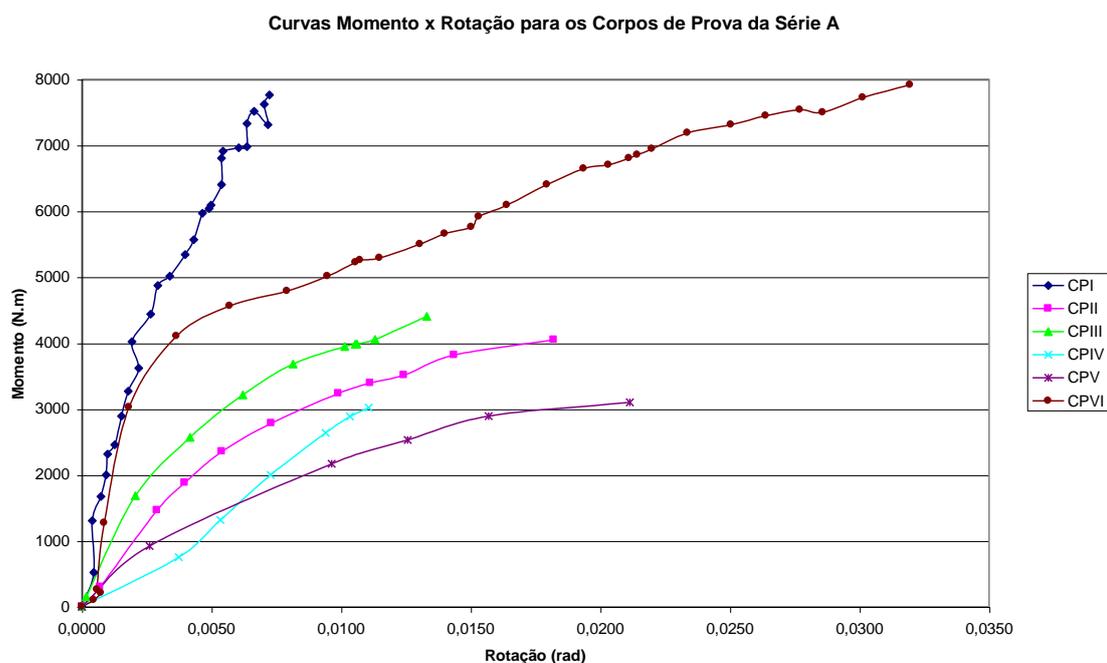


Figura 9 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série A

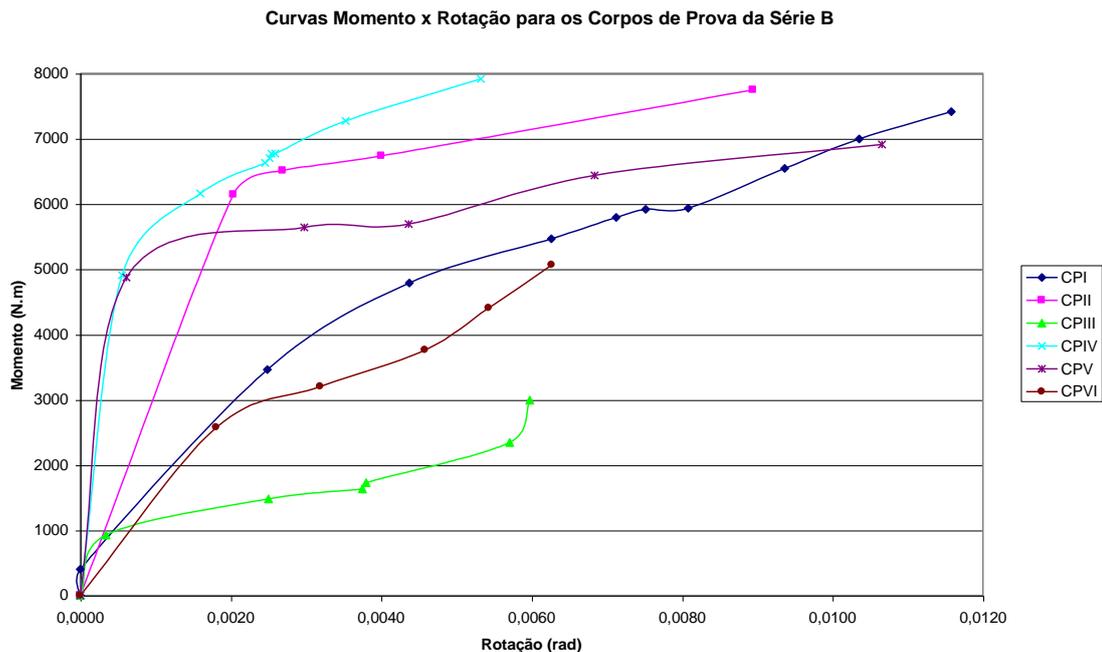


Figura 10 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série B

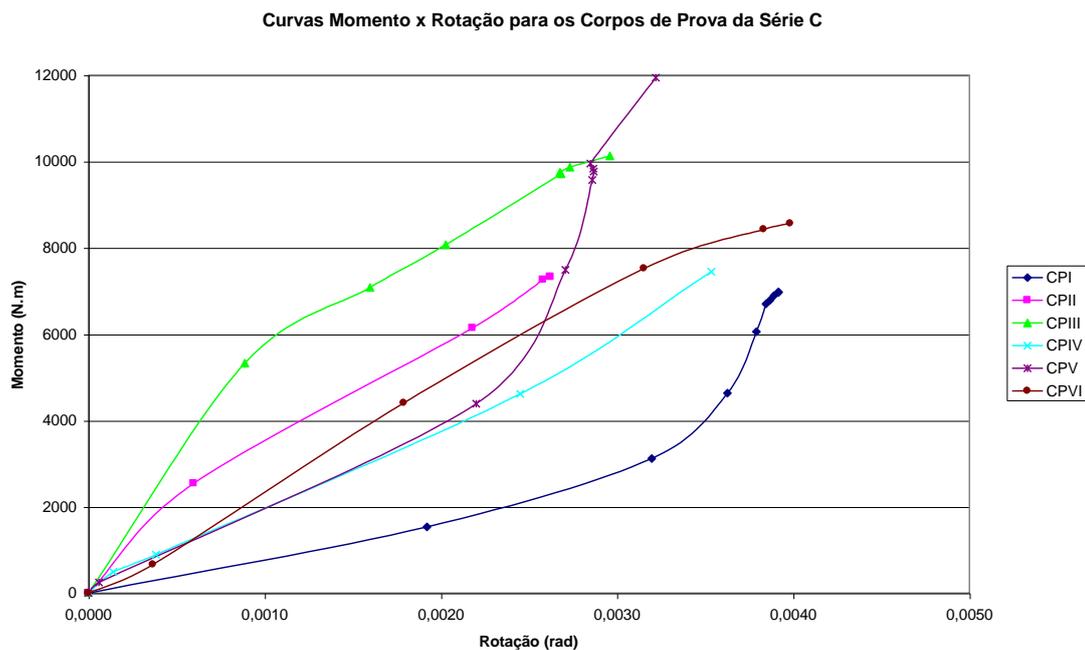


Figura 11 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série C

A determinação da rigidez rotacional da ligação foi feita de duas maneiras, a partir dos ensaios de flexão (resultados experimentais) e utilizando também os resultados dos ensaios de embutimento (resultados empíricos).

Os valores de rigidez rotacional experimental para cada série foram obtidos a partir dos gráficos momento x rotação (inclinação do trecho linear da curva), $K_{r, exp}$, resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores médios de $K_{r, exp}$ para as séries A, B e C

Série	$K_{r, \text{exp}}$ [N.m]
A	1.094.449,47
B	2.038.525,54
C	2.235.687,26

Os valores para a rigidez rotacional empírica de cada série foram calculados a partir dos ensaios de embutimento carga x deslizamento, tanto para o embutimento paralelo às fibras quanto para o embutimento normal às fibras. Foram determinados os valores de K_0 e K_{90} para cada um dos corpos-de-prova, a partir das inclinações das retas de tendência de cada ciclo. De posse desses valores, calculou-se para cada tubo o seu K_{α} , a partir da Equação 2 e, em seguida, o valor de K_r , da Equação 3. Este método foi proposto primeiramente por RACHER, P. (1996).

$$K_{\alpha j} = \frac{K_{0,j} K_{90,j}}{K_{0,j} \sin^2 \alpha_j + K_{90,j} \cos^2 \alpha_j} \quad (2)$$

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\alpha j} r_j^2 \quad (3)$$

onde: $K_{\alpha j}$ é o módulo de deslizamento na direção da força do conector j e r_j é a distância entre o centro do conector e o centro da ligação;

K_r é a rigidez rotacional da ligação (valor empírico).

Os valores médios de K_r , para cada série, estão resumidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores médios de K_r para as séries A, B e C

Série	K_r [N.m]
A	981.397,57
B	1.635.317,81
C	1.667.716,50

Comparando-se os Quadros 2 e 3 nota-se que os valores experimentais obtidos pelos dois métodos não são muito diferentes entre si, podendo ser feita uma estimativa da capacidade de carga da ligação através do método proposto por RACHER, P. (1996). Um pré-dimensionamento pode ser feito a partir da determinação dos valores K_0 e K_{90} , obtidos nos ensaios de embutimento. De posse desses valores, calcula-se para cada tubo o seu K_{α} , a partir da Equação 2 e, em seguida, o valor de K_r , da Equação 3. Assim é possível determinar a capacidade de carga de cada tubo (parafuso oco) da ligação, Equação 4 e Figura 12.

$$F_{M,j} = \frac{K_{\alpha,j} r_j}{K_r} M \quad (4)$$

onde $F_{M,j}$ é a carga em cada tubo;

r_j é a distância do centro do tubo ao centro da ligação, Figura 12.

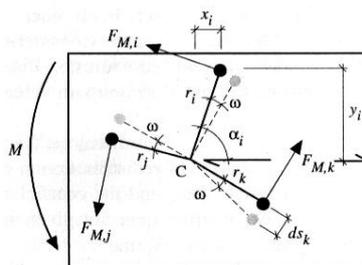


Figura 12 – Detalhe da ligação (RACHER, P. 1996)

4. CONCLUSÕES

Os preceitos de sustentabilidade, buscados na pesquisa e explicitados nos objetivos deste trabalho foram atendidos. O uso de menos material para compor os conectores na ligação, aliado à escolha da madeira (um material reconhecidamente voltado para um uso sustentável), que teve seu uso potencializado pela técnica do laminado colado, resultou num conjunto com características voltadas à sustentabilidade.

Como previsto houve o esmagamento da madeira e não a flexão do tubo nos ensaios de embutimento, evidenciando que os parafusos ocos, por si só, ainda suportariam mais carga. A ligação se mostrou eficiente e com comportamento previsto nos cálculos.

Para um pré-dimensionamento o método proposto por RACHER, P. (1996) se mostrou eficiente e esta estimativa pode ocorrer sempre que for não for possível fazer os ensaios de flexão e sim os de embutimento, que são mais fáceis de se executar, com apenas um conector.

O uso dos parafusos ocos, como apresentado neste trabalho, ainda não foi implementado em ligações estruturais em peças de madeira. Para a realização dos pré-dimensionamentos foram adaptadas as prescrições da norma NBR7190/1997 relacionadas aos parafusos comuns (parafusos maciços). Na literatura estrangeira este tipo de ligação está sendo estudado e se mostrou eficiente.

Espera-se que, com a inclusão do uso deste tipo de conector na referida norma brasileira, as pesquisas sejam intensificadas e os parafusos ocos, aqui abordados, tenham aplicação prática nas ligações das construções em madeira.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7190, 1997: Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira.

AWALUDIN, A.; HIRAI, T.; HAYASHIKAWA, T.; OIKAWA, A. 2011: **Beam to column timber joints with pretensioned bolts**. Civil Engineering Dimensions, Vol. 13, No.2.

BREMER, C. F. 1999: Ligações com tubos galvanizados em madeira laminada colada de eucalipto grandis, solicitadas a momento fletor e força cortante. **Dissertação – Escola de Engenharia da UFMG**, Belo Horizonte.

HEIDUSCHKE, A.; HALLER, P. 2008: Performance of composite-reinforced timber joints using single dowel-type fasteners. **10th World Conference on Timber Engineering - Miyazaki, Japan**.

LEIJTEN, J.M. 1996: The concept of the prestressed DVW reinforced joint with expanded tubes. **International wood conference**, Louisiana, USA, volume 2.

_____ 2011: Requirements for moment connections in statically indeterminate timber structures. *Engineering Structures*, Elsevier

MURTH, B. & SMITH, I. 2010: Tests and models for engineered wood product connections using small steel tube fasteners

Oliveira, M.A. M. 2001: Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. **Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos da USP**, São Carlos..

RACHER, P. 1996: **Moment resisting connections**. STEP lecture C16. CUST Civil Engineering Blaise Pascal University, Vol. 13, No.2.

RODD, P. D & GUAN, Z.W. 1999: Hollow steel dowels – a new application in semi-rigid timber connections. *Engineering Structures* Elsevier

YEBOAH, D; GILBERT, S.; GILFILLAN, R. 2009: The behaviour of moment-resisting timber joints using bonded steel rods. **11th International Conference on Non-conventional materials and Technologies (NOCMAT)**, Bath, UK.