

Efeito do torque e do tempo do aperto sobre a carga de ruptura e a rigidez da ligação parafusada em peças de maçaranduba (*Manilkara huberi* Ducke A. Chev)

Torque and tight time effect on the ultimate load and stiffness of maçaranduba (*Manilkara huberi* Ducke A. Chev) wood bolted joint

Samuel Roberto Fix Vieira¹, Cláudio Henrique Soares Del Menezzi² e Milton Luiz Siqueira³

Resumo

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do torque e do tempo do aperto sobre a carga máxima de ruptura e a rigidez em ligações parafusadas em madeira de maçaranduba (*Manilkara huberi*). As ligações foram feitas por quatro parafusos sextavados passantes de Ø 9,5mm com porca e arruela. A carga máxima e a rigidez foram avaliadas para dois níveis de torque (25 e 50 N.m) e controle (sem aperto). Para cada nível de torque, metade do material foi ensaiada logo após o aperto e a outra metade, seis meses depois. Observou-se que houve um aumento da carga de ruptura e um aumento na rigidez das ligações com o aumento do torque para o material avaliado imediatamente após o aperto do parafuso. Foi verificado que a carga máxima aumentou em 10% quando se aplicou 50 N.m de torque em comparação com a ligação controle, ao passo que a rigidez aumentou cerca de 30%. Entretanto, para o torque de 25 N.m as diferenças não foram significativas. Por outro lado, os ensaios realizados após seis meses comprovaram que com o tempo o efeito benéfico do torque sobre o aumento da carga de ruptura foi perdido, mas o ganho na rigidez da ligação foi mantido.

Palavras-Chave: Nível de torque, Carga máxima de ruptura, Rigidez em ligações parafusadas, Aperto do parafuso

Abstract

The paper aimed at evaluating the effect of the torque and time of tightening on the ultimate load and stiffness of maçaranduba (*Manilkara huberi*) wood bolted joints. The connections were assembled using four hexagonal 9.5mm Ø bolts with washer and nut. The ultimate load and stiffness were evaluated in samples tightened with two torque levels (25 and 50 Nm) and a control (non-tightened). For each torque level half of the samples were tested immediately after tightening and the other half six months later. According to the results, torque improved both the ultimate load and stiffness of the wood bolted joint tested immediately after assembling. The ultimate load for the 50N.m samples was 10% higher than that for control samples, whereas for stiffness the value was 30% higher. However, for the 25N.m samples there was no significant difference when compared to control samples. For the group tested after six months of assembling, the positive effect of torque on the ultimate load was lost, but it remained for stiffness.

Keywords: Torque level, Tightening effect on ultimate load, Stiffness of wood bolted joints

INTRODUÇÃO

A dimensão das peças de madeira encontradas no mercado é um fator limitante na construção de estruturas de madeira, uma vez que as peças são limitadas pelo tamanho das toras, meios de transporte e a capacidade de desdobro das máquinas. As peças de madeira serrada são fabricadas em com-

primentos ainda mais limitados, geralmente de 4 a 5m. Desta forma, a utilização de peças para vencer grandes vãos, erguer colunas e pisos de grandes dimensões só é possível por meio de ligações das diversas peças que compõem a estrutura. O conhecimento do comportamento e da propriedade dessas ligações em estruturas de madeira é fundamental para o desempenho do projeto estrutural.

¹Engenheiro Florestal pelo Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Caixa Postal 04357 - Brasília, DF - 70919-970 - E-mail: samuel.fvieira@gmail.com

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Caixa Postal 04357 - Brasília, DF - 70919-970 - E-mail: cmenezzi@unb.br

³Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília - L-2 Norte - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF - 70910-000 - E-mail: milton@unb.br

A norma brasileira de estruturas de madeira (NBR 7190/1997) admite o emprego de quatro tipos de ligações: cavilhas de madeira, pinos, anéis e chapas metálicas. Essas três últimas são chamadas de ligações mecânicas. Cavilhas e pinos metálicos são conectores que transferem esforços por meio de compressão das peças, mas estão sob ação de um esforço cisalhante. Por outro lado, anéis metálicos geram esforços de cisalhamento na madeira, enquanto as chapas transferem tensões até o ponto onde começam a escoar. No Brasil, as ligações por pinos metálicos (parafusos e pregos) são as mais utilizadas. A mesma norma estabelece que no cálculo das ligações parafusadas não seja permitido levar em consideração o esforço de coesão entre as superfícies das peças a serem ligadas. Esse esforço de coesão pode ser obtido, por exemplo, por meio do aperto do parafuso, aumentando-se assim o atrito entre as peças de madeira.

Dessa forma, as ligações parafusadas, à luz das normas de estruturas de madeira, são dimensionadas como funcionando sob o efeito de cisalhamento/flexão no parafuso e compressão na madeira. Nessas ligações quando o parafuso é apertado, uma força de tração é gerada comprimindo as peças que estão sendo conectadas. Assim, um maior nível de aperto poderia criar uma tensão de tração adicional no parafuso similar àquela que ocorre em sistemas protendidos, que tem sido estudados para aumentar a rigidez de estruturas laminares e treliçadas de madeira (CHEUNG e CALIL JR., 2006), aumentando o nível de coesão e atrito entre as peças, e, por conseguinte, a capacidade de carga da ligação. Estudos sobre protensão de parafusos em ligações de madeira são escassos podendo-se citar aqueles feitos por Awaludin *et al.* (2008a, 2008b e 2008c). Os resultados apontam que ligações parafusadas protendidas aumentam grandemente a rigidez e a capacidade de carga de ligações parafusadas.

Nesse contexto, Siqueira e Del Menezzi (2007) identificaram que o aumento do torque de aperto no parafuso propiciou um aumento da carga máxima de ruptura em ligações parafusadas de angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*). A carga máxima de ruptura aumentou até um nível de aperto do parafuso de 40N.m. No entanto, os autores chamam a atenção para o aspecto do comportamento viscoelástico da madeira, que pode provocar o afrouxamento da ligação, minimizando o efeito do torque ao longo do tempo. Ademais, as variações dimensionais sofridas

pela madeira quando em uso, em função das variações ambientais, também podem implicar em relaxamento da ligação ao longo do tempo. Em sistemas protendidos, esse relaxamento da tensão também pode ocorrer.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito do torque de aperto e do tempo do aperto sobre a carga máxima de ruptura e a rigidez de ligações parafusadas em peças estruturais de madeira.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material lenhoso e preparação das amostras

Segundo estudo realizado por Oliveira (2008) as espécies mais comercializadas no Distrito Federal para finalidades estruturais são: *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho), *Manilkara huberi* (maçaranduba) e *Alexa grandiflora* (melanciaira). Nesse sentido, foi escolhida a espécie *Manilkara huberi* com base na disponibilidade no mercado no período de coleta do material. Inicialmente o material obtido foi identificado macroscopicamente por meio da comparação com o material depositado na Xiloteca (Index Xilarium FPBw) do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) e em seguida foi colocado em câmara climática (65% URA; 20°C) até massa constante. Após a climatização o material foi desdobrado para confecção dos corpos-de-prova (CP) para determinação da carga máxima de ruptura da ligação no sentido perpendicular segundo as dimensões descritas na NBR7190 (1997). As dimensões das peças foram: 40mm de espessura para a central (t2), com seção de 120x200 mm e 20mm para as laterais (t1), com seção 120x360 mm. As ligações foram feitas por quatro parafusos sextavados de aço Ø 9,5 mm com porca e arruela de 4 mm de espessura. O distanciamento entre as linhas de parafusos tanto no sentido paralelo quanto sentido perpendicular foi de 40 mm, respeitando-se a distância da borda de 40 mm. Foram confeccionados ao todo 20 CPs, que foram divididos aleatoriamente em cinco lotes de quatro CPs cada.

Foram avaliados o efeito de torques de 25N.m e 50N.m. O torque foi aplicado por meio de um torquímetro de estalo. As peças foram confeccionadas em um mesmo tempo, mas foram ensaiadas em períodos distintos. Doze CPs foram ensaiados logo após sua confecção e/ou assim que foi realizado o aperto dos parafusos, enquanto

que os restantes oito CPs foram testados após seis meses de aperto do parafuso. Quatro CPs foram montados sem aperto, e esse lote foi tratado como controle. Desta forma, os cinco lotes (Tabela 1) foram assim identificados: controle, T25-0 (torque 25N.m), T50-0 (torque 50N.m), ensaiados de imediato; T25-6 e T-50-6, ensaiados após seis meses após o aperto dos parafusos. Os CPs ensaiados após seis meses foram mantidos em câmara climática (65% UR; 20°C).

Tabela 1. Desenho experimental.
Table 1. Experimental design.

Tratamento	Torque	Período de Ensaio	N.º CPs
Controle (CP)	-	Imediato	4
T-25-0	25	Imediato	4
T-25-6	25	6 meses	4
T-50-0	50	Imediato	4
T-50-6	50	6 meses	4

Ensaio mecânico

Os ensaios foram conduzidos em máquina universal de ensaio INSTRON MODEL 1127, informatizada pela CONTENCO, seguindo os procedimentos da norma ASTM D5652 (2000). Foi medida a deformação dos corpos de prova desde o início da aplicação da carga de compressão e elaborada a curva carga-deformação. Foi observado e registrado o comportamento geral da ligação sob carregamento e a carga de ruptura. O ensaio foi finalizado após a ruptura do CP ou quando atingiu o deslocamento máximo de 15 mm.

Os ensaios duraram aproximadamente 10 minutos, usando-se uma velocidade de carga de 1,0 mm/min. Para se determinar a rigidez da ligação, após os ensaios, foi traçada uma linha de tendência linear pela origem ($y = b \cdot x$) para os

dados de carga (y) e deslocamento (x) compreendidos entre 10% e 50% da carga de ruptura. O coeficiente angular (b) da reta foi admitido como sendo a rigidez da ligação, ou seja, o valor necessário para deslocar a ligação em 1,0mm, equivalente $\approx 10\% \varnothing$ do parafuso.

Análise estatística

A análise estatística dos dados foi feita em dois momentos. Inicialmente, para se avaliar o efeito imediato do torque, utilizou-se análise de variância (ANOVA) seguida pelo método Least Square Difference (LSD), permitindo que médias dos três tratamentos fossem comparadas em pares e as diferenças entre elas, estatisticamente avaliadas. Por outro lado, o efeito do tempo do aperto foi analisado separadamente para cada nível de torque (25 e 50 N.m) por meio de ANOVA, permitindo-se assim a comparação entre médias da carga de ruptura e rigidez da ligação imediatamente e após seis meses de aperto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Influência do torque na carga de ruptura e na rigidez da ligação

A Figura 1 apresenta o resultado do efeito do torque sobre a carga de ruptura e rigidez da ligação ensaiada logo após o aperto da ligação. A carga de ruptura obtida quando se aplicou um torque de 50 N.m foi superior àquela obtida para a testemunha e o torque de 25 N.m. Entretanto, para o torque de 25 N.m, a carga de ruptura não foi maior em comparação com o controle. Observou-se que a rigidez também aumentou com o torque de 50 N.m.

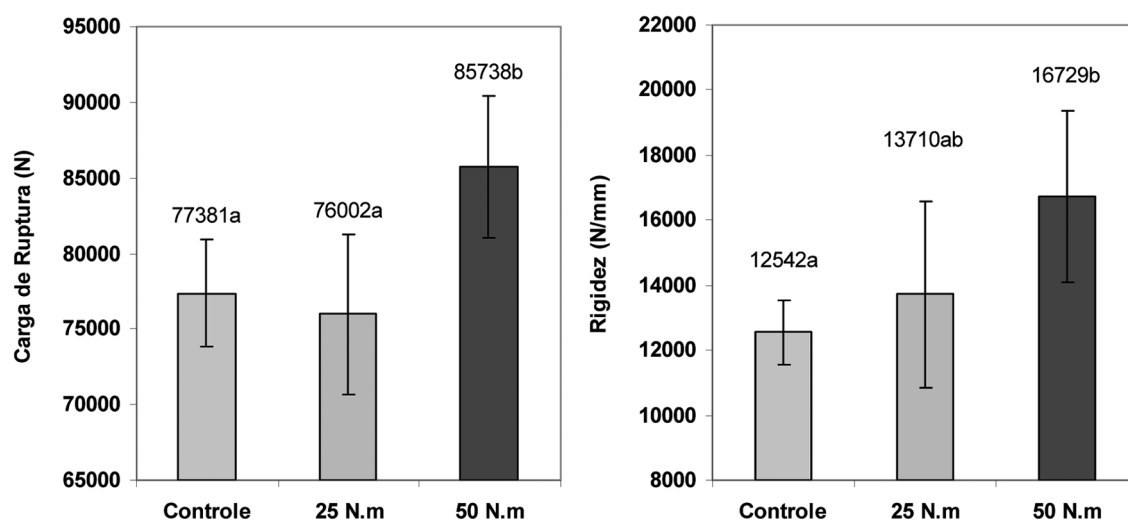


Figura 1. Carga de ruptura e rigidez da ligação submetida a diferentes níveis de aperto do parafuso (Nota: CPs ensaiados imediatamente após o aperto; letras diferentes indicam média estatisticamente diferente pelo teste LSD).

Figure 1. Ultimate load and stiffness of wood bolted joint according to the torque levels. (Note: Samples tested immediately after tightening; different letters indicate statically different means according to the LSD test).

Tabela 2. Comparação par a par da média de cada um dos tratamentos avaliados imediatamente após o aperto.
Table 2. Mean comparison of a pair of each treatment tested immediately after tightening.

Variável	(I) torque	(j) torque	Diferença (I-J)	Significância
Carga de Ruptura	0	25	1379,25	0,680
		50	-8356,75	0,030*
	25	0	-1379,25	0,680
		50	-9736,00	0,015*
	50	0	8356,75	0,030*
		25	9736,00	0,015*
Rigidez	0	25	-1167,75	0,496
		50	-4186,50	0,031*
	25	0	1167,75	0,496
		50	-3018,75	0,100
	50	0	4186,50	0,031*
		25	3018,75	0,100

* significativo ao nível de $\alpha=0,05$ pelo método Least Square Difference.

Observou-se que os coeficientes de variação foram baixos, em torno de 5% a 7% o que reflete a homogeneidade do material e o bom planejamento experimental. A análise LSD mostrou (Tabela 2) que a carga máxima de ruptura das amostras de controle foi estatisticamente igual ao tratamento T-25-0. Já o tratamento T-50-0 foi estatisticamente maior do que o tratamento controle e do tratamento T-25-0. Essa análise mostrou que no período imediato o torque de 50 N.m aumenta a capacidade de carga da ligação, ao passo que o torque de 25 N.m não afetou a carga máxima de ruptura da ligação. Observa-se também, que a rigidez do tratamento controle foi igual a do tratamento T-25-0. Por sua vez, a rigidez do tratamento T-50-0 foi maior do que a do tratamento controle e estatisticamente igual a do tratamento T-25-0. Apenas a título de comparação, já que esse tipo de dado é escasso na literatura, Rammer (1999) estudou a rigidez obtida em ensaios de embutimento paralelo com parafusos de 12,7 mm nas madeiras de *Brosium alcastrum* e *Vatairea lundelli*, duas espécies de folhosas, e obtiveram valores de 9300 N/mm e 10220 N/mm, respectivamente. A diferença significativa entre esses valores e os observados no presente trabalho pode ser admitida em função da diferença de densidade entre as espécies: $\approx 0,73 \text{ g/cm}^3 \times 0,92 \text{ g/cm}^3$.

Siqueira e Del Menezzi (2007) obtiveram resultados semelhantes aos do presente trabalho, ao estudarem o efeito do torque numa ligação parafusada com madeira de *Dinizia excelsa* Ducke. (angelim vermelho). Foram estudados cinco níveis de torque: (10, 20, 30, 40 e 50 N.m) nos corpos de prova com seções $6 \times 12 \times 30 \text{ cm}^3$ e $6 \times 16 \times 30 \text{ cm}^3$, sendo utilizados parafusos 9,5mm, com porcas e arruelas. O resultado mostrou que nos CPs de seção $6 \times 12 \text{ cm}$ a carga ruptura aumentou com o aumento do torque até 40N.m.

Awaludin *et al.* (2008a) analisaram o efeito

do protensionamento do parafuso sobre o desempenho cíclico de ligações parafusadas de madeira sujeitas ao momento fletor. Foi observada uma diferença significativa da rigidez rotacional cíclica entre as ligações protendidas ($\approx 935 \text{ kNm/rad}$) e a controle ($\approx 286 \text{ kNm/rad}$). Entretanto, o protensionamento apenas aumentou ligeiramente ($\approx 14,87 \text{ kN.m} \times 13,42 \text{ kN.m}$) a capacidade de resistência ao momento fletor. Esses mesmos autores (AWALUDIN *et al.*, 2008b) avaliaram ligações protendidas parafusadas madeira-placa de aço com um único parafuso. Foram avaliados níveis de carga de protensionamento (4,0 kN e 9,2 kN), que implicaram em tensões de compressão entre a madeira e a placa de 0,7 e 1,6 N/mm², respectivamente. Observaram que as cargas de ruptura foram maiores nas ligações protendidas em maior nível que nas ligações não protendidas: 39,96 kN (sem protensão), 38,62 kN (0,7 N/mm²) e 42,54 kN (1,6 N/mm²).

A Figura 2 apresenta o comportamento médio da relação carga x deslocamento para os três tipos das ligações testadas. Evidencia-se que a curva de 50N.m é mais inclinada que as demais, enquanto que a de 25N.m é ligeiramente mais inclinada que a do controle. Awaludin *et al.* (2008b) analisando os gráficos de carga x deslocamento das ligações protensionadas, observaram o aumento carga (maior inclinação da curva) no início do ensaio e argumentam que isso se deve ao aumento da fricção entre a placa de aço e a madeira, ocasionada pela protensão. A fricção entre os elementos de ligação é desprezada nos cálculos das estruturas de madeira, e nesse sentido os autores apresentam uma equação que leva em consideração esse fator na determinação da capacidade de carga de uma ligação. Sjödin *et al.* (2008) também estudaram o efeito da fricção em ligação de madeira de *Pinus sylvestris* com pinos metálicos.

Avaliaram a capacidade de carga de ligações em ensaios de tração com pinos metálicos lisos e com ranhuras. Os resultados apontaram que as ligações com pinos ranhurados apresentaram maior capacidade de carga que aquelas com pino liso ($\approx 19,1 \text{ kN} \times 13,3 \text{ kN}$). Em outras palavras, a rigidez de ligações protendidas foi também aumentada, o que corrobora os resultados obtidos nesse presente trabalho.

Influência do tempo do aperto

O comparativo da média dos valores da carga máxima para cada nível de torque no período imediato e no período de seis meses é apresentado na Figura 3. Conforme pode ser observado, para a carga de ruptura o efeito benéfico do aperto da ligação não é mais observado após seis meses. Notou-se que para os corpos de prova submetidos ao torque de 25 N.m e ensaiados depois de seis meses, a carga de ruptura aumentou ligeiramente, de 76002 N para 78109 N. Entretanto, estatisticamente esse pequeno aumento na capacidade de carga não foi significativo (Tabela 3). Esse resultado já era esperado, uma vez que já no período imediato o torque de 25 N.m não afetou

a carga de ruptura das ligações. Por outro lado, para os corpos de prova submetidos a 50 N.m de torque, a carga de ruptura diminuiu significativamente (Tabela 3) após seis meses, passando de 85738 N para 75436 N. Esses resultados mostram que o efeito do torque na carga de ruptura da ligação foi perdido após seis meses.

Observou-se que o tempo do aperto não afetou a rigidez, conforme pode ser observado na Figura 3. Nos corpos de prova submetidos a torque de 25 N.m tanto no período imediato quanto no período de seis meses, as médias encontradas para a rigidez foram próximas (13710 N/mm x 12861 N/mm), não sendo identificada assim diferença estatisticamente significativa, conforme a Tabela 3. O tempo do aperto também não influenciou a rigidez das ligações com 50 N.m. No período imediato a rigidez encontrada foi de 16729 N/mm, sendo praticamente a mesma após seis meses: 16388 N/mm.

Pode-se concluir que o efeito benéfico do aperto do parafuso para carga de ruptura é perdido após seis meses, mas se mantém para a rigidez da ligação. Awaludin *et al.* (2008c) estudaram o relaxamento de ligações parafusadas protendidas após um ano. Foi analisada a rigidez de ligações

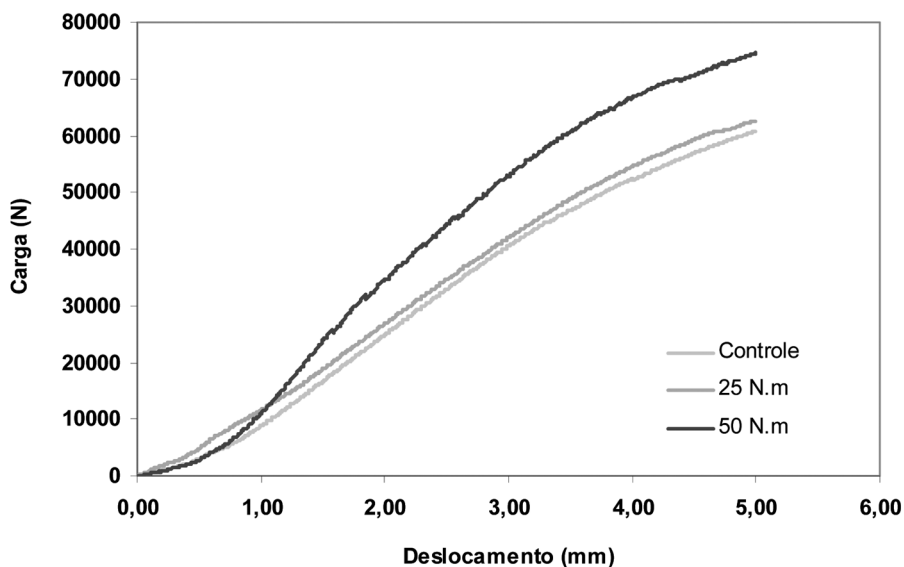


Figura 2. Comportamento médio para a relação carga x deslocamento para as ligações controle, com 25 N.m e 50 N.m de aperto.

Figure 2. Mean behavior of the relationship between load x displacement for non-tightened and tightened wood bolted joint (25 N.m and 50 N.m).

Tabela 3. Resumo da ANOVA para o efeito do período do aperto do parafuso sobre a carga de ruptura e a rigidez das ligações.

Fonte	Variável	Torque	GL	Quadrado Médio	F	Significância
Período	Carga de Ruptura	25	1	8993040,5	0,153	0,709
		50	1	212262408,0	13,481	0,010**
	Rigidez	25	1	1439904,5	0,204	0,667
		50	1	231880,5	0,060	0,814
Erro	Carga de Ruptura	25	6	58868395,3		
		50	6	15752080,9		
	Rigidez	25	6	7044761,8		
		50	6	3841636,6		

sujeitas ao esforço de momento fletor. Os autores observaram que após esse período a tensão residual foi equivalente a apenas 23%, entretanto, para as ligações que foram novamente protendidas durante esse período, o nível de tensão residual foi de 66%. Argumentam ainda, que o efeito benéfico do protensionamento sobre a rigidez da ligação pode ser negligenciável, sem que os parafusos sejam novamente protendidos ano a ano.

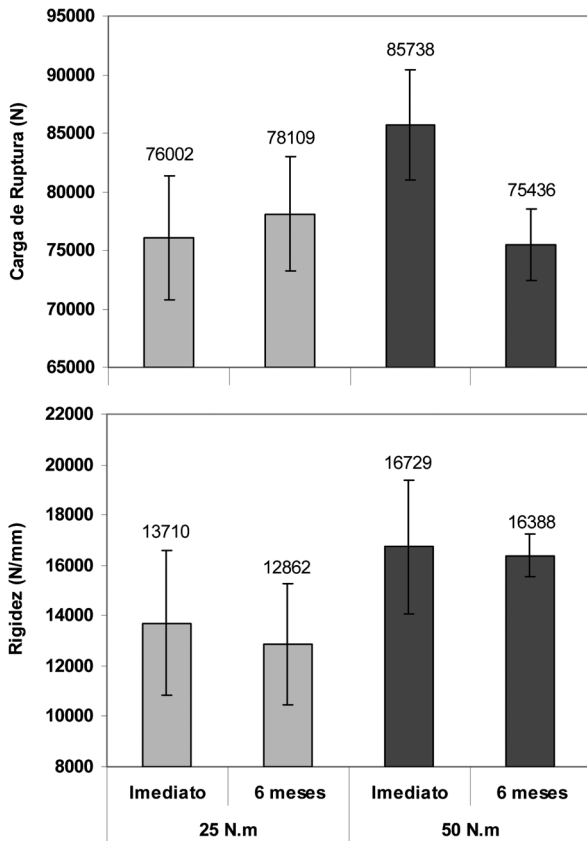


Figura 3. Comparação entre a carga de ruptura e rigidez das ligações ensaiadas logo após o aperto e após seis meses.

Figure 3. Comparison between ultimate load and stiffness of wood bolted joint tested immediately and six months after tightening.

CONCLUSÕES

Foram obtidas duas conclusões principais:

- O torque aplicado aumenta a carga de ruptura e a rigidez de ligações parafusadas de madeira;
- Entretanto, com o passar do tempo, o efeito benéfico do torque não é mais sentido pela carga de ruptura, mas pela rigidez esse efeito ainda é sentido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PIBIC/CNPq/UnB pela bolsa de Iniciação Científica e ao Laboratório de Produtos Florestais (SFB) pelo apoio na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira: NBR 7190.** Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for bolted connections in wood and wood-based products: D5652-95.** Philadelphia, 2000.

AWALUDIN, A.; HIRAI, T.; HAYASHIKAWA, T.; SASAKI, Y.; OIKAWA, A. One-year stress relaxation of timber joints assembled with pretensioned bolts. **Journal of Wood Science**, Amsterdam, v.54, p.456-463, 2008a.

AWALUDIN, A.; HIRAI, T.; HAYASHIKAWA; SASAKI, Y. Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt. **Journal of Wood Science**, Amsterdam, v.54, p.362-368, 2008b.

AWALUDIN, A.; HIRAI, T.; HAYASHIKAWA; SASAKI, Y.; OIKAWA, A. Effects of pretension in bolts on hysteretic responses of moment-carrying timber joints. **Journal of Wood Science**, Amsterdam, v.54, p.114-120, 2008c.

CHEUNG, A.B.; CALIL JR., C. Tabuleiro ortótropo treliçado protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v.8, n.30, p.79-100, 2006.

OLIVEIRA, V.M.; DEL MENEZZI, C.H.S.; CAMARGOS, J.A.A.; VALE, A.T. Adequação às normas e qualidade da madeira serrada para fins estruturais comercializada no Distrito Federal. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.3, p.405-412, 2008.

RAMMER, D.R. Parallel-to-grain dowel-bearing strength of two Guatemalan hardwoods. **Forest Products Journal**, Madison, v.49, n.6, p.77-87, 1999.

SIQUEIRA, M.; DEL MENEZZI, C.H.S. Influence of the torque on the ultimate load of wood bolted joint. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19, Brasília, 2007. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2007. 7p.

SJÖDIN, J.; SERRANO, E.; ENQUIST, B. An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.66, p.363-372, 2008.

Recebido em 13/01/2009

Aceito para publicação em 25/09/2009