

Influência da densidade básica de madeiras em furações para ligações coladas com barras de aço**Influence of the basic density of wood in drillings for glued connections with steel bars**

DOI:10.34115/basrv4n6-009

Recebimento dos originais: 11/10/2020

Aceitação para publicação: 11/11/2020

Mário dos Santos Bulhões

Mestre em Engenharia Industrial - UFBA

Instituição: Doutorado em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia

Endereço: Rua Aristides Novis, nº 2 - Federação. Salvador - BA. CEP: 40160-170

E-mail: mario_b_7@hotmail.com

João Miguel Santos Dias

Mestre em Engenharia Ambiental Urbana - UFBA

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Endereço: Rua Topázio, nº 100 - Vila São Francisco. Açailândia - MA. CEP: 65930-000

E-mail: joao.dias@uemasul.edu.br

Rita Dione Araújo Cunha

Doutora em Engenharia de Produção - UFSC

Instituição: Núcleo de Inovação Tecnológica da Universidade Federal da Bahia

Endereço: Rua Aristides Novis, nº 2 - Federação. Salvador - BA. CEP: 40160-170

E-mail: ritadi@uol.com.br

Sandro Fábio César

Doutor em Engenharia de Produção - UFSC

Instituição: Departamento de Construção e Estruturas da Universidade Federal da Bahia

Endereço: Rua Aristides Novis, nº 2 - Federação. Salvador - BA. CEP: 40160-170

E-mail: sfcesarpaz@uol.com.br

RESUMO

As conexões estruturais coladas entre barras de aço e madeira são uma alternativa de grande potencial, quando comparadas com as ligações usuais, conjugando alta resistência mecânica, durabilidade em ambientes corrosivos e estética melhorada. No entanto não existem formulações numéricas consensuais para a previsão da sua capacidade de carga, além de não existirem metodologias de ensaio e procedimentos de execução padronizados. De entre os parâmetros que interferem na resistência mecânica das ligações está o ângulo de formado entre a barra e as fibras da madeira, relacionado com a orientação da furação da madeira durante a execução. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da esbeltez da ligação e da densidade da madeira nos desvios ocorridos durante a furação. Foram realizadas furações com diâmetro constante e comprimento variável, em madeiras de *corymbia citriodora* e maçaranduba (*manilkara elata*). O ensaio de determinação da densidade básica das madeiras apresentou valores de 701,80 kg/m³ para a *corymbia citriodora* e 962,54 kg/m³ para a maçaranduba. Constatou-se que os ângulos entre as barras de aço e as fibras da madeira aumentaram com a densidade e com a esbeltez da ligação.

Palavras-chave: Madeira, ligações coladas, densidade, inclinação.

ABSTRACT

Structural connections glued between steel and wood bars are a great potential alternative when compared to the usual connections, combining high mechanical resistance, durability in corrosive environments and improved aesthetics. However, there are no consensual numerical formulations for the prediction of their load capacity, besides there are no standardized test methodologies and execution procedures. Among the parameters that interfere in the mechanical resistance of the connections is the angle formed between the bar and the wood fibres, related with the wood drilling orientation during the execution. The purpose of this work is to assess the influence of the bond slimness and wood density on the deviations occurring during the drilling. Drilling operations with constant diameter and variable length were performed in *corymbia citriodora* and maçaranduba (*manilkara elata*) woods. The test to determine the basic density of woods showed values of 701.80 kg/m³ for *corymbia citriodora* and 962.54 kg/m³ for maçaranduba. It was found that the angles between the steel bars and the wood fibres increased with the density and with the slimness of the connection.

Keywords: Wood, glued connections, density, slope.

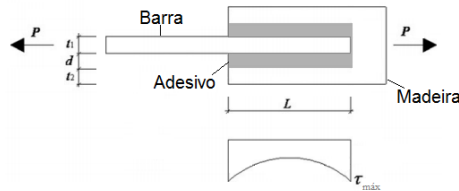
1 INTRODUÇÃO

A utilização da tecnologia das ligações coladas entre barras de aço e madeira se iniciou nos anos 70, nos países do norte da Europa (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001a). Segundo Chans et al. (2010), este tipo de conexão em estruturas de madeira possui várias aplicações, como por exemplo: reforço de elementos estruturais sujeitos à alta concentração de tensões, reabilitação estrutural, prevenção de fissuras e estruturas em formato de treliças espaciais. Chans et al. (2013) referem que as ligações coladas entre barras de aço e madeira também podem ser utilizadas em ligações de estruturas reticuladas e em locais de transição entre madeira e outros materiais. Tlustochowicz et al. (2011) refere que as vantagens deste tipo de ligação são: alta resistência mecânica e rigidez, transferência eficiente de esforços através da continuidade do adesivo, estética melhorada e elevada resistência ao fogo. Estas conexões apresentam os conectores e o adesivo completamente embutidos na madeira, o que sustenta a exposição de Pigozzo et al. (2006b) na qual é referido que estas ligações apresentam boa durabilidade em relação à ação dos agentes climáticos. Custódio et al. (2011) expõem que estas ligações são executadas rapidamente, acrescentam pouco peso à estrutura, não exigem muitas alterações nos elementos estruturais e requerem pouca quantidade de mão de obra, diminuindo os custos de produção. Estas ligações poderão ser executadas *in situ* (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001a) ou forra da obra (STEPINAC et al. (2013).

Quanto ao mecanismo de funcionamento das ligações coladas entre barras de aço e madeira, Tlustochowicz et al. (2011) expõem que estas estão sujeitas predominantemente às solicitações axiais, sendo que o adesivo realiza a transferência de esforço entre a barra de aço e a madeira através do seu cisalhamento. O diagrama do esforço de cisalhamento na linha de cola está apresentada na Figura 1. Tlustochowicz et al. (2011) referem que o comportamento mecânico das ligações é influenciado pelas condições de carregamento e de contorno, características dos materiais envolvidos e pela geometria da ligação. Apesar das vantagens e versatilidade destas ligações, ainda não é possível encontrar formulações numéricas para a previsão da capacidade de carga que reúnam consenso no seio da comunidade científica, sendo necessário proceder a ensaios destrutivos que, por sua vez, também não possuem metodologias padronizadas. As divergências são devidas ao fato da conexão apresentar materiais com comportamentos mecânicos distintos (CHANS et al., 2008), além do caráter anisotrópico e heterogêneo da madeira (BENGTSSON et al., 2000), fazendo com que o mecanismo de funcionamento da conexão seja altamente complexo. A execução dos corpos de prova (CPs) é uma etapa do processo de avaliação experimental na qual são introduzidos no alguns dos parâmetros geométricos referenciados por Tlustochowicz et al. (2011). Esta etapa, que também não possui procedimentos padronizados, é relevante para o estudo experimental das ligações, uma vez que poderão ser introduzidos parâmetros que interferem no comportamento mecânico das conexões e que poderão estar fora do âmbito de estudo,

podendo camuflar os resultados. Um exemplo disso é o ângulo de inclinação entre a barra de aço e as fibras da madeira (α), condicionado pela orientação da furação.

Figura 1. Distribuição do esforço de cisalhamento. Adaptado de: Tlustochowicz et al. (2011)



Devido à anisotropia da madeira, é relevante expor as considerações apresentadas pela bibliografia quanto ao posicionamento da barra em relação às fibras da madeira. Segundo exposição de Pigozzo et al. (2006a), as ligações com barras de aço perpendiculares às fibras possuem maiores rigidezes. Faye et al. (2004) e Widmann et al. (2007) acrescentam que esta configuração permite obter uma maior resistência mecânica da ligação. Por outro lado, Miotto (2009) e Chans et al. (2014) referem que as conexões apresentam deslocamentos acentuados e Gustafsson et al. (2001) e Yeboah et al. (2009) expõem que a capacidade de carga da ligação é menor quando a direção da barra é perpendicular às fibras. Chans et al. (2014) afirmam que o impacto da variação de α depende da esbelteza da ligação (λ)¹, apesar disso Yeboah et al. (2009) expõem que esse fato só acontece de forma significativa quando a barra está paralela às fibras. Apesar de Yeboah et al. (2009) afirmarem que a inclinação da barra em relação às fibras da madeira não interfere significativamente na capacidade de carga da ligação, Tlustochowicz et al. (2011) referem que α deverá ser minimizado.

Desde março de 2015, ocorre uma investigação na Universidade Federal da Bahia para avaliar a influência de λ na capacidade de carga de ligações coladas entre barras de aço e madeira de *corymbia citriodora* e de maçaranduba (*manilkara elata*). Durante a execução dos CPs, foi verificado que o paralelismo entre as barras e as fibras das madeiras não foi totalmente conseguido. Uma vez que os desempenhos mecânicos das conexões são influenciados por α e que este depende da orientação da furação da madeira durante a execução dos CPs, o objetivo deste trabalho é avaliar as influências da densidade da madeira e da esbelteza da ligação na inclinação da furação.

2 METODOLOGIA

Uma vez que se pretendia avaliar os ganhos de resistência mecânica das ligações, foi estipulado oito séries com valores de λ variando entre 5 e 22,5. O menor valor de λ corresponde ao mínimo

¹ A esbelteza da ligação (λ) deve ser entendida como a relação entre o comprimento de embutimento da barra de aço na madeira (L) e o seu diâmetro (d), sendo calculada da seguinte forma: $\lambda = L / \varnothing$.

apresentado por Pigozzo et al. (2006a) e o maior valor do intervalo foi adotado para avaliar eventuais acréscimos de resistência mecânica das ligações, além do limite referido pelos mesmos autores. Segundo Aicher et al. (1998), a distância entre as extremidades embutidas das barras (L_i) deverá ser igual ao comprimento de embutimento das barras (L) para que não haja decréscimo da resistência mecânica, o que resulta num comprimento total dos CPs igual a três vezes o comprimento de embutimento das barras (L) – Figura 2. A seção transversal dos CPs é quadrada com 3,5 cm de largura, devido à necessidade de evitar a ruptura por separação da madeira. Na Tabela 1 estão apresentadas as nomenclaturas e os comprimentos dos furos dos CPs.

Figura 2. Variáveis geométricas das ligações coladas entre barras de aço e madeira. Adaptado de: Chans et al. (2009)

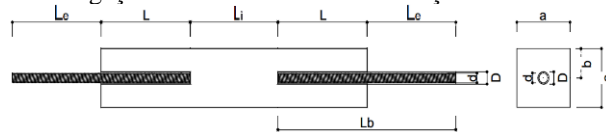


Tabela 1- Nomenclaturas e comprimento dos furos

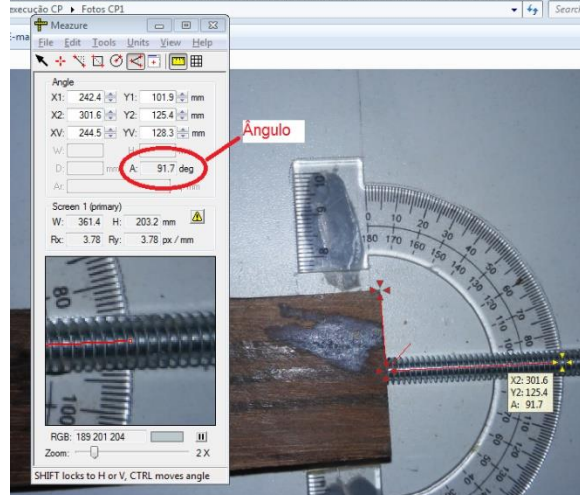
Espécie de madeira	Nomenclaturas	λ	Comp furos (cm)
Corymbia citrodora	E1-x	5,0	3,2
	E2-x	7,5	4,7
	E3-x	10,0	6,3
	E4-x	12,5	7,9
	E5-x	15,0	9,5
	E6-x	17,5	11,0
	E7-x	20,0	12,6
	E8-x	22,5	14,2
Maçaranduba	M1-x	5,0	3,2
	M2-x	7,5	4,7
	M3-x	10,0	6,3
	M4-x	12,5	7,9
	M5-x	15,0	9,5
	M6-x	17,5	11,0
	M7-x	20,0	12,6
	M8-x	22,5	14,2

As barras são rosqueadas, compostas por aço galvanizado, com diâmetro de 6,3 mm, sendo o seu comprimento total (L_b) dependente do seu comprimento de embutimento (L) acrescido de um comprimento exterior (L_e) constante de 20 cm para fixação nas garras da prensa. A madeira de *corymbia citrodora* foi cedida pela *CM Venturoli*, proveniente de plantações localizadas no interior do estado da Bahia e a madeira de maçaranduba foi oferecida pela *Madeireira Vitória* é do norte do Brasil. A escolha

por madeiras de alta densidade foi devida à exposição de Chans et al. (2009) na qual é referido que existem poucos estudos de ligações coladas com barras de aço rosqueadas e madeira de alta densidade. Foi utilizado o adesivo epóxi bi-componente *Compound* da *Vedacit*. A broca para furação, com utilização indicada para fibrocimento e mourões, possui 28 cm de comprimento e 8 mm de diâmetro, garantindo uma espessura de adesivo igual a 0,85mm, em conformidade com o intervalo de valores de 1,2d e 1,5d apresentados por Pigozzo et al. (2006a). Foram estipuladas seis repetições por cada série, correspondente à quantidade necessária para proceder à caracterização simplificada segundo a NBR 7190, resultando no total de 96 CPs. A furadeira de bancada utilizada é da marca *Helmo*, modelo *FBE-16*, está localizada na carpintaria da Escola Politécnica da UFBA e é movida por um motor de monofásico da *Eletromotores WEG, S. A.*, modelo C560884, com 1720 rotações por minuto, corrente elétrica de 110/220v e com potência de ½ hp.

A execução dos CPs foi iniciada com o corte das madeiras e respectiva furação, conforme a Tabela 1, perfazendo um total de 192 furos. De seguida, os orifícios foram limpos através de jato de ar comprimido, para remoção de partículas de pó de serra, prejudiciais à qualidade da adesão. Foi injetado epóxi no furo, com posterior inserção da barra e mantiveram-se os CPs em posição vertical durante sete dias de modo a evitar o deslocamento das barras e a permitir a cura total do adesivo. Após esse período foram anotadas as inclinações das barras através do registro fotográfico de todas as posições dos CPs, com posterior medição através do *software Measure* (Figura 3), contabilizando 768 registros fotográficos.

Figura 3. Medição da inclinação das barras em relação às fibras. Fonte: autor



Após a realização dos ensaios de tração em prensa universal Instron 1000 HDX, procedeu-se ao ensaio de determinação da densidade básica das madeiras, segundo a metodologia modificada da NBR 7190, com realização das medições da massa dos CPs às 08:30 e 17:30 durante três dias até se obter uma

variação inferior a 0,5%. Foram escolhidos três CPs dentro de cada série, tendo sido extraídas amostras com dimensões (3,0x2,0x5,0)cm³, preconizadas na norma supracitada. Uma vez que os CPs das séries E1-x, E2-x, M1-x e M2-x, possuem (L) inferior a 5 cm, não foi possível aferir a sua densidade básica, resultando na utilização de 36 CPs.

3 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os valores médios das densidades básicas de cada série. Um aspecto relevante é o fato da maçaranduba apresentar maior densidade básica que a *corymbia citriodora*.

Tabela 2- Densidades básicas das madeiras

CP	Densidade básica média (kg/m ³)	Média (kg/m ³)
E3-x	708,32	701,80
E4-x	749,15	
E5-x	734,24	
E6-x	630,78	
E7-x	701,30	
E8-x	687,00	
M3-x	979,97	962,54
M4-x	965,54	
M5-x	956,02	
M6-x	1001,69	
M7-x	929,12	
M8-x	942,88	

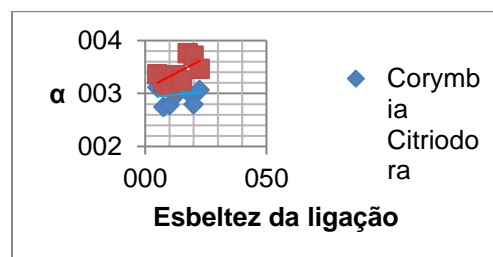
Registraram-se os valores máximos de α de cada CP, para posterior cálculo dos seguintes valores em cada série: média, desvio padrão, coeficiente de variação e α máximo. Na Tabela 3 estão apresentados os valores estatísticos para os valores máximos de α de cada série. A maçaranduba apresenta média, máximos e desvio padrão superiores à *corymbia citriodora* (3,41° contra 2,98°; 4,81° contra 4,23°; 0,98 contra 0,91, respectivamente). É possível verificar que a *corymbia citriodora* apresenta maiores valores do coeficiente de variação que a maçaranduba.

Posteriormente foi realizada análise estatística recorrendo ao teste *t-student* bilateral, com duas amostras independentes, com 94 graus de liberdade, significância de 5% e tendo como hipótese nula: “A densidade não interfere no ângulo de furação”. Os resultados apresentaram um t_{calc} igual a 2,247 e um t_{crit} com valor de 1,661. Por conseguinte, a inferência estatística permite concluir que a hipótese nula deverá ser rejeitada.

Tabela 3- Valores estatísticos de α

CP	Média de α (°)	Desv. padrão	Coef. de variação (%)	α máx. (°)
E1-x	3,12	0,96	30,80	4,60
E2-x	2,75	0,59	21,42	3,60
E3-x	2,78	1,24	44,67	4,70
E4-x	2,97	0,55	18,67	3,90
E5-x	3,35	1,45	43,41	4,70
E6-x	3,03	0,65	21,33	3,90
E7-x	2,80	0,59	21,07	3,50
E8-x	3,07	1,21	39,38	4,90
Média	2,98	0,91	30,09	4,23
M3-x	3,13	0,56	18,02	3,60
M4-x	3,35	1,05	31,46	5,20
M5-x	3,25	1,55	47,66	5,50
M6-x	3,77	1,19	31,58	6,00
M7-x	3,72	1,24	33,28	5,00
M8-x	3,47	1,09	31,32	4,90
Média	3,41	0,98	28,70	4,81

Para a análise da influência da esbeltez da ligação, a Figura 4 apresenta o gráfico que relaciona a variação dos valores de α com λ . É possível verificar que a maçaranduba apresenta maiores valores de α do que a *corymbia citriodora*. No caso da maçaranduba, é possível verificar que existe uma linha de tendência com declive mais acentuado do que no caso da *corymbia citriodora*.

Figura 4. Relação entre α e λ . Fonte: autor

4 DISCUSSÃO

Comparando os valores obtidos para a densidade básica da *corymbia citriodora* com o valor de 867 kg/m³ apresentado por IPT (2015a), se constata que o material ensaiado apresenta um valor inferior. Para a maçaranduba, o valor da densidade básica apresentado por IPT (2015b) é de 833 kg/m³, diferindo bastante do valor obtido neste estudo (962,54 kg/m³). A diferença poderá ser devida às diferentes condições de crescimento das madeiras, da diferença de espécies ensaiadas e do local da árvore do qual foram extraídos os CPs.

No que concerne aos ângulos, o teste *t-student* permite indicar que os desvios da furação são maiores no caso da maçaranduba. Este fato poderá ser devido à dificuldade da broca em penetrar na madeira, resultando no escorregamento desta, uma vez que a alta densidade implica um menor volume de vazios entre os elementos anatômicos da madeira. A influência do modo de execução do furo é um fator relevante uma vez que a altura da broca é controlada manualmente e, conseqüentemente, existe uma tendência a aplicar mais força no caso da maçaranduba, o que poderá favorecer ainda mais o escorregamento da broca. Por outro lado, se a furação ocorrer lentamente, poderá originar a combustão da superfície da madeira, diminuindo a capacidade de carga (BENGTSSON et al., 2000).

A idade da furadeira poderá influenciar o ângulo da furação, devido às folgas nos mandris que diminuem a precisão. A furadeira utilizada na execução destas ligações possui idade avançada, devendo ser admitidos erros inerentes ao equipamento. O estado da broca também deverá ser considerado, uma vez que, não estando devidamente afiada, poderá obrigar o operário a aplicar mais força, acentuando os desvios.

O fato da *corymbia citrodora* possuir menor densidade e, conseqüentemente maior quantidade de espaços entre os elementos anatômicos, permite uma maior facilidade de penetração da broca, reduzindo o seu escorregamento. A facilidade de penetração da broca se reflete na maior variação dos ângulos, traduzida pelo maior coeficiente de variação (30,09 contra 28,70 da maçaranduba), necessitando maior precisão na furação.

A influência da esbeltez da ligação é mais acentuada na maçaranduba, podendo ser justificado pelo fato do escorregamento ocorrer em um maior comprimento para valores de λ superiores. O aumento da inclinação da furação também poderá ser justificado pelo aumento do tempo no qual está a sendo exercida força na manivela de controle da broca.

5 CONCLUSÃO

As inclinações das furações tendem a aumentar com o acréscimo da densidade da madeira. A tendência para ocorrer desvios durante a furação é maior com o aumento da esbeltez da ligação e para madeiras de maior densidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem às seguintes entidades: CNPq, FAPESB, *CM Venturoli, Madeireira Vitória e Vedacit*.

REFERÊNCIAS

- AICHER, S.; HÖFFLIN, L.; WOLF, M. Influence of specimen geometry on stress distributions in pull-out tests of glued-in steel rods in wood. **Otto-graf-journal**. V. 9, p. 205-217, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- BENGTTSSON, C.; KEMMSIES, M.; JOHANSSON, C. J. **Production control methods for glued-in rods for timber structures**. In: Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering. Whistler, 2000.
- BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Effect of timber moisture content on bonded-in rods. **Construction and Building Materials**. n. 15, p. 17-25, 2001a.
- CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Glued in joints in hardwood timber. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 28, p. 457-463, 2008.
- CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber. **Materials and Design**. v. 30, p. 1325-1332, 2009.
- CHANS, D. O. et al. Influence of timber density on the axial strength of joints made with glued-in steel rods: An experimental approach. **International Journal of Adhesion And Adhesives**. v. 30, p. 380-385, 2010.
- CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Orientation of bars glued on glued laminated products: Parallel vs perpendicular. **Composites: Part B**. v. 62, p. 97-103, 2014.
- CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Withdrawal strength of threaded steel rods glued with epoxy in wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 44, p. 115-121, 2013.
- CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. Rehabilitation of timber structures – Preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives. **Construction and Building Materials**. n. 25, p. 3570-3582, 2011.
- FAYE, C. et al. **French data concerning glued-in rods**. In: Proceedings of the 37th Conference Of CIB-W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Edinburgh, 2004.
- GUSTAFSSON, P.; SERRANO, E. Glued-in rods for timber structures – development of a calculation model. **Report TVSM – 3056**. Lund: Lund University, 2001.
- IPT. Informações sobre madeiras – Eucalipto citriodora. São Paulo: IPT, 2013. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/12.htm>. Acesso em: julho de 2015a.
- IPT. Informações sobre madeiras – Maçaranduba. São Paulo: IPT, 2013. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/4.htm>. Acesso em: julho de 2015b.

- MIOTTO, J. L. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 2009. 357p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

- PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. **Avaliação da resistência de ancoragem de barras de aço coladas à 45°, em vigas roliças naturais de eucaliptus citriodora, tratadas com CCA.** In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. Anais do X Ebramem. São Pedro – SP, 2006a.

- PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. **Comparações das resistências de ancoragens de barras de aço, coladas com resina epóxi, submetidas a diferentes tratamentos superficiais e variações de umidades após as colagens, em vigas de eucalipto citriodora.** In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. Anais do X Ebramem. São Pedro – SP, 2006b.

- STEPINAC, M. et al. **Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards.** In: Proceedings of the 46th Conference Of CIB-W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Vancouver, 2013.

- TLUSTOCHOWICZ, G.; SERRANO, E.; STEIGER, R. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. **Materials and Structures.** n. 44, p. 997–1020, 2011.

- WIDMANN, R; STEIGER, R.; GEHRI, E. Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain. **Materials and Structures.** v. 40, p. 827-838, 2007.

- YEBOAH, D.; GILBERT, S.; GILFILAN, R. **The behaviour of moment-resisting timber joints using bonded steel rods.** In: Proceedings of the Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (NOCMAT), Bath, 2009.