

Influência dos defeitos de execução e da madeira na resistência mecânica de ligações coladas com barras de aço**Influence of execution defects and wood on the mechanical resistance of glued connections with steel bars**

DOI:10.34115/basrv4n6-010

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 constituem uma opção vantajosa face às ligações estruturais usuais devido ao seu comportamento mecânico, durabilidade, comportamento ao fogo e a aparência estética melhorada. Apesar do seu grande potencial e da sua utilização ter sido iniciada há cerca de quarenta anos, ainda não existe consenso científico quanto às formulações numéricas para previsão da capacidade de carga presentes nas normas de dimensionamento de estruturas de madeira. O objetivo deste trabalho é investigar as influências de erros de execução (colagem defeituosa e desalinhamento das barras) e dos defeitos de crescimento da madeira na resistência mecânica de ligações coladas entre barras rosqueadas de aço galvanizado de diâmetro reduzido e madeira de *corymbia citriodora*. Os resultados mostram que não existiu influência de erros de execução e dos defeitos da madeira para valores de esbeltez da ligação acima de 5.

Palavras-chave: Madeira, ligações coladas, aço, epóxi.

ABSTRACT

Structural connections glued between steel bars and wood are an advantageous option compared to usual structural connections due to their mechanical behaviour, durability, fire behaviour and improved aesthetic appearance. Although their great potential and their use started about forty years ago, there is still no scientific consensus regarding numerical formulations to predict the load capacity present in the design standards of wood structures. The purpose of this work is to investigate the influences of execution errors (defective gluing and bar misalignment) and wood growth defects in the mechanical resistance of glued connections between threaded bars of reduced diameter galvanised steel and *corymbia citriodora* wood. The results show that there was no influence of execution errors and wood defects for bond slinness values above 5.

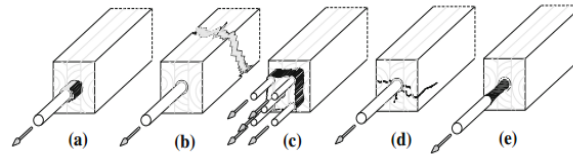
Keywords: Wood, glued connections, steel, epoxy.

1 INTRODUÇÃO

O estudo das ligações coladas entre barras de aço e madeira se iniciou nos países do norte da Europa há cerca de 40 anos (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001b). Chans et al. (2010) expõem que estas ligações são utilizadas para reforçar elementos estruturais sujeitos a altas concentrações de tensões, prevenção de fissuras, treliças espaciais e substituição de partes danificadas de estruturas de madeira. Este tipo de conexão também poderá ser utilizada em ligações pilar-viga, pilar-fundação, emendas de vigas e em locais de transição entre madeira e outros materiais (CHANS et al., 2013). Estas ligações possuem a barra e o adesivo embutidos na madeira, permitindo uma maior resistência à corrosão (PIGOZZO; LAHR, 2006b). Tlustochowicz et al. (2011) acrescentam que as conexões possuem alta rigidez e resistência mecânica, eficiência na transferência esforços entre materiais, boa estética e resistência ao fogo elevada. Custódio et al. (2011) apresentam outras vantagens destas ligações: rápida execução, baixa intervenção nos elementos estruturais existentes e necessidade de pouca quantidade de mão de obra. A versatilidade da execução destas ligações permite a sua confecção *in situ* (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001b) ou fora da obra (STEPINAC et al., 2013).

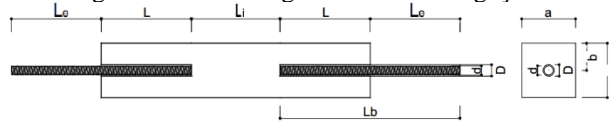
Tlustochowicz et al. (2011) referem que o mecanismo de funcionamento destas conexões consiste na transferência de esforços axiais da madeira para a barra, e vice-versa, através do cisalhamento da camada de adesivo. Os mesmos autores expõem que o desempenho mecânico das ligações depende do carregamento, condições de contorno, características dos materiais e geometria da conexão. Quando as ligações são solicitadas até ao seu estado limite último, poderão apresentar os seguintes modos de ruptura: ruptura por cisalhamento (Figuras 1a e 1c), condicionada pela resistência ao cisalhamento da madeira, devido à insuficiência de volume de madeira em volta da barra; ruptura por tração do bloco de madeira (Figura 1b), quando a barra está posicionada perpendicularmente às fibras da madeira; ruptura por separação da madeira na direção tangencial às fibras (Figura 1d), devido a carregamentos axiais irregulares ou à insuficiente quantidade de madeira em volta da barra; ruptura por escoamento da barra (Figura 1e), condicionada pelo fato da resistência à tração da barra ser o elo mais fraco da ligação. A ruptura da ligação por intermédio do escoamento da barra é o modo de ruptura preferencial, uma vez que confere à ligação uma maior ductilidade e previsibilidade do seu comportamento. A Figura 2 apresenta algumas das variáveis geométricas das ligações coladas entre barras e madeira. Nela estão representados: o diâmetro do furo (D), o diâmetro da barra de aço (d), a largura da seção transversal (a), a distância da extremidade da seção de madeira até o eixo da barra (b), o comprimento da barra (L_b), comprimento exterior da barra (L_e) e o comprimento de ancoragem (L). A esbelteza da ligação (λ) é a relação entre o comprimento de embutimento da barra (L) e o seu diâmetro (d), sendo calculada através do seguinte modo: $\lambda = L/d$.

Figura 1. Modos de ruptura das ligações coladas com barras.



Fonte: Tlustochowicz et al. (2011)

Figura 2. Variáveis geométricas das ligações.



Adaptado de: Chans et al. (2009)

A dificuldade da previsão do comportamento mecânico das ligações é devida à heterogeneidade e anisotropia da madeira, conforme exposição de Bengtsson et al. (2000), e devido ao fato das ligações possuírem materiais com comportamentos mecânicos distintos (CHANS et al., 2008). Segundo Stepinac et al. (2013), as fórmulas de previsão da capacidade de carga das ligações apresentam relação linear entre a espessura do adesivo e λ . Chans et al. (2008) e Martín et al. (2013) referem que as relações entre a resistência mecânica e a espessura do adesivo com λ não são totalmente linear. Outros autores referem ainda que os ganhos de resistência mecânica apenas são verificados até um valor limite de λ , conforme apresentado na Tabela 1. Serrano (2001) e Chans et al. (2009) afirmam que os picos de esforço de cisalhamento nas extremidades dos comprimentos dos adesivos aumentam com o incremento de λ , diminuindo a uniformidade da distribuição dos esforços. Outro parâmetro geométrico que não reúne consenso científico é a inclinação da barra em relação às fibras da madeira. Nos estudos de Gustafsson et al. (2001) e de Yeboah et al. (2009) é referido que a resistência mecânica máxima da ligação é atingida quando a barra está posicionada paralelamente às fibras da madeira. Faye et al. (2004) e Widmann et al. (2007) afirmam que a resistência máxima da ligação é obtida para o caso em que a barra se posiciona perpendicularmente às fibras da madeira. Chans et al. (2014) expõem que o impacto da variação do ângulo formado entre a barra e as fibras da madeira depende da esbeltez da ligação. Tlustochowicz et al. (2011) afirmam que, em qualquer caso, a inclinação entre a barra e as fibras da madeira deverá ser minimizada. Quanto aos defeitos de colagem, no estudo de Bengtsson et al. (2000), foram realizados ensaios em corpos de prova (CPs) compostos por barras de aço galvanizado rosqueado, epóxi e madeira laminada colada de espruce da Noruega (*picea abies*), com o objetivo de analisar a influência de erros de colagem. Os furos foram preenchidos com adesivo até metade do seu volume, tendo sido registrados decréscimos da resistência mecânica entre 20% e 39%.

Tabela 1. Resumo dos valores limites da esbeltez da ligação.

Autores	λ_{\min}	λ_{\max}
Buchanan e Deng (1996)	-	20
Pigozzo e Lahr (2006a)	5	20
Norma DIN 1052 (2008)	máximo entre 10 e 0,5d	-
Chans et al. (2013)	-	15 (baixa densidade) 18 (alta densidade)

Existem divergências no seio da comunidade científica no que concerne ao modo de relacionamento dos diversos fatores (geometria da ligação, materiais, condições de contorno e carregamento) com a resistência mecânica da ligação. Por outro lado, a quantidade de estudos existentes ainda é insuficiente, sendo um exemplo disso a exposição de Chans et al. (2009), na qual é referida a escassez de estudos envolvendo madeira de alta densidade. Por conseguinte, não existem formulações numéricas consensuais para a previsão da capacidade de carga destas ligações, o que implica na necessidade de recorrer a ensaios destrutivos. Concomitantemente, o objetivo deste estudo é investigar as influências dos erros de execução (colagem defeituosa e inclinação das barras em relação às fibras) e dos defeitos de crescimento da madeira na resistência mecânica das ligações coladas entre barras de aço e madeira de *corymbia citriodora*.

2 METODOLOGIA

A madeira utilizada foi *corymbia citriodora*, cedida pela empresa *CM Venturoli Ltda*, sendo esta espécie bastante utilizada em estruturas de madeira e proveniente de cultivos localizados no estado da Bahia. As barras utilizadas eram compostas por aço galvanizado rosqueado e de diâmetro 6,3mm. A escolha pelas barras rosqueadas se deveu ao fato de estas permitirem uma maior área de contato com o adesivo e de dispensarem tratamentos superficiais para garantir a adesão (CHANS et al., 2013). O fato do diâmetro da barra ser reduzido permite conferir à ligação um tipo de ruptura dúctil (PARIDA et al., 2013), o que confere um maior grau de segurança à estrutura. O adesivo utilizado foi o epóxi *Compound* de média viscosidade e bi-componente, fornecido pela *Vedacit*. A escolha do epóxi se deveu ao fato deste adesivo estrutural possuir melhor desempenho mecânico, durabilidade, exibir baixa retração durante a cura e possuir tolerância em relação às variações dimensionais da madeira, quando sujeita às variações de umidade e temperatura (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001a).

A esbeltez da ligação variou entre 5 e 22,5 em incrementos de 2,5 para que fosse possível verificar eventuais ganhos de resistência além dos limites de Pigozzo et al. (2006a) apresentados na Tabela 1. A distância entre as extremidades das barras (L_i) foi mantida igual ao comprimento de

ancoragem das barras (L), seguindo as recomendações de Aicher et al. (1998). A maioria das normas de dimensionamento apresentadas por Tlustochowicz et al. (2011) referem que a distância entre o eixo das barras (b) e a borda dos CPs deverá ser superior a $2,5d$, devido à necessidade de evitar a ruptura por tração tangencial às fibras (figura 1d), o que resultaria na diminuição da capacidade de carga da ligação. Por conseguinte foi estipulado o valor mínimo de b igual a 1,75 cm, resultando numa seção transversal quadrada com (3,5 x 3,5)cm. A furação foi realizada com o diâmetro de 8mm, o que resultou numa espessura de adesivo de 0,85mm, em conformidade com o intervalo apresentado por Pigozzo et al. (2006a) de $1,2d$ e $1,5d$. Foram realizadas seis repetições por cada série de ensaios, totalizando 48 CPs, em conformidade com as disposições da NBR 7190 (ABNT, 1997) para a caracterização simples de uma amostra. Na Tabela 2 estão apresentadas as nomenclaturas, os valores das esbeltezes das ligações e os respectivos valores de L_b para cada série de CPs.

Tabela 2. Nomenclaturas e geometria dos CPs.

Série	λ	L_b (cm)
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

A execução dos CPs se iniciou com o corte das madeiras com comprimentos iguais a três vezes L_b no sentido das fibras. Foram registradas as umidades através de um xilohigrômetro de contato DUC 2050 da Digisystem em dois CPs em simultâneo. A medição da umidade com um xilohigrômetro de contato se deveu à necessidade de manter a integridade da madeira dos CPs, o que não poderia ser conseguido através de um xilohigrômetro de cravação ou medição através de secagem em estufa. Após a furação, os orifícios foram limpos com um jato de ar comprimido para remoção de partículas de pó de serra que poderiam formar pontos fracos de adesão e, conseqüentemente, condicionar o desempenho da ligação. Para a formação do adesivo, misturaram-se os dois componentes em partes iguais com o auxílio de uma balança de precisão. Procedeu-se à injeção do adesivo nos furos e, posteriormente, foi introduzida a barra rotacionalmente para evitar a formação de bolhas de ar, para evitar descontinuidades na interface adesivo-barras, o que poderia diminuir a resistência da ligação (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001c). Nos casos em que a quantidade de adesivo introduzida foi insuficiente, procedeu-se ao seu complemento através da colocação de adesivo na superfície da barra. Após o período de cura do adesivo durante sete dias, conforme recomendações do fabricante, foi realizado o registro

fotográfico dos defeitos de crescimento e de secagem das madeiras e dos ângulos de inclinação entre as barras e as fibras da madeira, uma vez que estes fatores podem interferir na resistência mecânica da ligação. Os CPs foram submetidos a ensaios de tração numa prensa universal Instron HDX 1000 com célula de carga de 1000 kN e velocidade de ensaio de 50 N/seg, resultando em durações de ensaios de 5 ± 2 min, conforme as disposições da norma EN 408 (CEN, 2011) para ensaios de curta duração. Após os ensaios, os CPs foram abertos para registro fotográfico da presença de defeitos de colagem.

3 RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta as umidades médias obtidas para cada série de CPs, sendo possível verificar que o valor mínimo é de 16,0% e o máximo é de 18,6%. A Tabela 4 apresenta a quantidade de defeitos da madeira, contabilizados através da avaliação visual das faces dos CPs. Os ângulos das barras em relação às fibras da madeira variaram entre 0° e $4,9^\circ$. As médias das forças de ruptura dos CPs estão na Tabela 5, onde é possível verificar que a série E1-x apresenta a menor força de ruptura. O modo de ruptura na série E1-x foi o cisalhamento da madeira (Figura 3a) na série E1-x e nas restantes séries a ruptura foi o escoamento da barra (Figura 3b). Na Tabela 6 está a quantidade de defeitos de colagem dos CPs, baseada na presença de bolhas de ar na interface barra-adesivo.

Tabela 3. Umidades médias dos CPs

Série	Umidade média (%)
E1-x	17,3
E2-x	16,7
E3-x	18,6
E4-x	17,4
E5-x	17,8
E6-x	16,0
E7-x	16,5
E8-x	17,6
Média	17,2

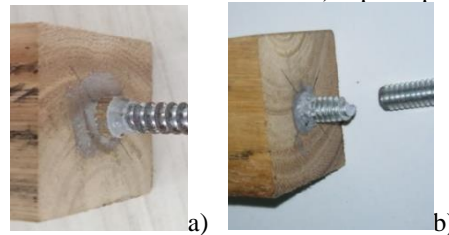
Tabela 4. Nº de defeitos da madeira em cada série

Série	Nós	Fissuras	Medula	Bolsas de resina
E1-x	0	1	0	0
E2-x	1	0	0	1
E3-x	3	1	0	0
E4-x	4	0	1	0
E5-x	15	0	1	3
E6-x	21	1	3	1
E7-x	8	1	2	1
E8-x	23	1	3	0

Tabela 5. Forças de ruptura médias dos CPs.

Série	Força de ruptura média (kN)
E1-x	14,99
E2-x	16,93
E3-x	17,34
E4-x	15,28
E5-x	16,71
E6-x	17,36
E7-x	18,50
E8-x	17,11

Figura 3. a) ruptura por cisalhamento da madeira. b) ruptura por escoamento da barra.



Fonte: Autor

Tabela 6. N° de CPs com defeitos de colagem

Série	N° de defeitos de colagem
E1-x	1
E2-x	4
E3-x	5
E4-x	3
E5-x	1
E6-x	2
E7-x	2
E8-x	3

4 DISCUSSÃO

Os defeitos dos CPs detectados foram: teor de umidade, defeitos de colagem, defeitos de crescimento da madeira e ângulos de inclinação entre as barras e as fibras da madeira. Os valores de teor de umidade obtidos variaram entre 16,0 % e 18,6%, estando acima de 12%, conforme recomendação de Lartigau et al (2015). Atendendo ao fato de que a madeira utilizada possuía idade jovem, a dificuldade em evitar os defeitos de crescimento durante a execução aumentou para os CPs com maior λ . A quantidade de defeitos de colagem coincidiu com os casos em que houve complemento de adesivo, confirmando a exposição de Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2011). Os ângulos formados entre as barras e as fibras das madeiras foram originados pela orientação da furação das madeiras.

A força de ruptura da ligação aumentou de $\lambda=5,0$ para $\lambda=7,5$, confirmando as exposições da bibliografia quanto ao aumento da resistência mecânica com o incremento de λ . Para $\lambda=5,0$, a carga de ruptura foi inferior, o que se deveu ao fato da ligação ter sido condicionada pela resistência ao

cisalhamento da madeira. Para $\lambda > 5$, a carga de ruptura variou entre 15,28 kN e 18,50kN, devido ao escoamento da barra, inerente ao fato desta não possuir resistência mecânica suficiente para suportar os ganhos de resistência.

5 CONCLUSÃO

A capacidade de carga das ligações aumenta com o incremento de λ , no entanto não foi possível apurar o modo de proporcionalidade. Os defeitos de colagem, os ângulos de inclinação entre a barra e as fibras da madeira, o teor de umidade da madeira acima de 12%, os defeitos da madeira (crescimento e secagem) não influenciaram a resistência mecânica das ligações para $\lambda > 5$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes entidades: CNPq, *CM Venturoli* 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. Adhesive systems for structural connections in timber. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. n. 21, p. 177-186, 2001a.
- BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Effect of timber moisture content on bonded-in rods. **Construction and Building Materials**. n. 15, p. 17-25, 2001b.
- BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber. **Materials and Structures**, v. 34, p. 100-109, 2001c.
- BUCHANAN, A.; DENG, X. **Strength of steel rods in glulam timber**. In: Proceedings of the International Wood Conference. New Orleans, 1996.
- CEN. EN 408: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2011.
- 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.; 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.
- 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.
- 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.
- DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin: DIN, 2008.

- 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.
- LARTIGAU, J. et al. Effect of temperature on the mechanical performance of glued-in rods. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 57, p. 79-84, 2015.
- MARTÍN, E.; ESTÉVEZ, J.; OTERO, D. Influence of geometric and mechanical parameters on stress states caused by threaded rods glued in wood. **European Journal of Wood Production**. v. 71, p. 259-266, 2013.
- PARIDA, G.; JOHNSON, H.; FRAGIACOMO, M. Provisions for ductile behavior of timber-to-steel connections with multiple glued-in rods. **Journal of Structural Engineering**. v. 139, p. 1468-1477, 2013.
- 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.
- SERRANO, E. Glued-in rods for timber structures – a 3D model and finite element parameter studies. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. n. 21, p. 115-127, 2001.
- 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.