

## **Evaluación del Desempeño de Adhesivos Estructurales, a través de Ensayos de Arrancamiento de Barras de Acero, en Madera Brasileira Pegada Laminada de Alta Densidad**

Carvalho, Eliene Pires, Carrasco, Edgar V. Mantilla  
Departamento de Ingeniería de Estructuras  
Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Av. Do Contorno 842, 2º andar – Centro, CEP 30110-060, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil  
eliene@dees.ufmg.br, mantilla@dees.ufmg.br

### **Resumen**

*En este artículo son verificados los desempeños de 5 tipos de adhesivos estructurales, a través de ensayos de arrancamiento de barras de acero, pegadas en madera pegada laminada (MPL) de alta densidad, en la dirección normal a las fibras. La madera utilizada fue Eucalyptus grandis y las barras de acero fueron del tipo CA-50, con diámetros nominales de 10,0 mm. Las larguras de anclaje fueron iguales a 10 veces los diámetros de las barras, siguiendo las orientaciones del EUROCODIGO 5. Los diámetros de los huecos fueron iguales a 11,0 mm. El modo de ruptura de la mayoría de los cuerpos de prueba fue caracterizado por el aplastamiento del adhesivo y su pérdida total de adherencia con la barra de acero. El modo de ruptura de todos los cuerpos de prueba, pegados con Sikadur 32 fue caracterizado por la pérdida total de adherencia del adhesivo con la pared del orificio y por la fuerte adherencia del adhesivo con la barra de acero. Los resultados mostraron que la resistencia de arrancamiento y el modo de ruptura fueron considerablemente influenciados por el tipo de adhesivo, manteniéndose constantes todas las propiedades geométricas de las juntas y la densidad de la madera.*

**Palabras claves:** ensayo de arrancamiento, madera pegada laminada, adhesivos, acero.

### **Abstract**

*This paper shows experimental results of the performance of structural adhesives obtained through pull-out tests of steel rods under axial load. The steel rods were glued into glulam perpendicular to the grain, using epoxy resins. The timber specie used in the tests was Eucalyptus grandis hardwood. Five different adhesive types were used to glue 10 mm diameter rods with anchorage lengths of 100 mm. The anchorage lengths were according to EUROCODE 5 recommendation. The holes diameters were 1mm larger than the nominal diameter of the rod. The main failure mode was by failure of the adhesive and its bond to steel or wood. The results show that the pull-out strength and failure modes of an axially loaded glued-in rod depends on the adhesive types.*

**Keywords:** pull-out tests, glulam, adhesives, glue-in rods.

### **1. Introducción**

Las barras pegadas son utilizadas en estructuras de Maderas como conectores entre elementos estructurales o como refuerzo, en áreas sometidas a grandes esfuerzos de tracción normal a las fibras. Las conexiones realizadas con barras pegadas son rígidas y muy resistentes. Ella también mejora la apariencia de la estructura y su resistencia al fuego, porque son embutidas dentro de piezas de madera [1].

El EUROCODIGO 5 propone, en su anexo, especificaciones para el uso de barras pegadas en las estructuras de madera, entretanto, estas

especificaciones han sido cuestionadas por varios investigadores.

Para contextualizar estas cuestiones se pueden citar, inicialmente, las consideraciones realizadas en [1]. Según este autor, la necesidad de especificaciones más adecuadas en los códigos europeos propicio, en 1998, la creación de un proyecto de investigación denominado GIROD (Glue-in Rods for Timber Structures). El objetivo de este grupo, formado por institutos de investigaciones de varios países, fue desenvolver expresiones para el cálculo de la resistencia de barras de acero pegadas, sometidas a cargas axiales. Para esto, fueron realizados varios programas experimentales

Recibido: Junio, 2007

Aceptado: Agosto, 2007

utilizándose barras acero rosqueadas o de poliéster reforzadas con fibra de vidrio. Los resultados experimentales, obtenidos en estos programas, fueron utilizados para el desenvolvimiento de un modelo numérico utilizando el método de los elementos finitos considerando la no linealidad física del material. El objetivo principal del modelo fue prever la resistencia al arrancamiento de las barras pegadas en la madera [1].

En 2001, fue propuesto un método de ensayo para la determinación de la resistencia de adherencia y de las características de fractura de las barras pegadas en MPL. Esos resultados fueron importantes para complementar los modelos teóricos utilizados en las simulaciones numéricas hechas por el autor [2].

La forma de realización de los ensayos, el tipo de adhesivo y la espesura de la línea adhesiva fueron nuevamente citados en 2003 [3]. En este trabajo fueron indicadas modificaciones para las ecuaciones propuestas por el EUROCODIGO 5, considerando la resistencia del adhesivo y la espesura de la unión.

También fue resaltado que un método de teste padrón sería muy útil para la determinación de estas propiedades básicas. Otros investigadores [4] citaron que las espesuras de adhesivo entre 1 e 2 mm indicaron un mejor comportamiento en la rigidez y la resistencia de las uniones.

En 2007, utilizando un programa de elementos finitos, fueron realizadas simulaciones de ensayos de arrancamiento para analizar la influencia de cada parámetro geométrico de la unión en los modos de ruptura que afectan a la madera [5]. Los autores de esta investigación citaron que el principal modo de ruptura observado, para las barras pegadas en la dirección paralela a las fibras, fue la ruptura de la madera adyacente a la línea adhesiva. Ellos también resaltaron que los otros modos de ruptura pueden ser evitados adoptándose un volumen suficiente de madera alrededor de la barras y utilizándose un adhesivo con mayor resistencia al cizallamiento que la madera.

Otros investigadores [6] citaron, en 2006, que la resistencia al arrancamiento depende de la densidad de la madera, de la largura de anclaje ( $l$ ) y de una razón de esbeltez dada por  $\lambda=l/d_h$  ( $d_h$ = diámetro del hueco). A partir de estos parámetros, los autores propusieron nuevas modificaciones en las ecuaciones propuestas por el EUROCODIGO 5, para el cálculo de la resistencia de barras pegadas, sometidas a esfuerzos axiales.

En 2007 fue realizado un estudio por [7] sobre la resistencia al arrancamiento en maderas de alta densidad. En esta investigación, los resultados experimentales fueron comparados con los valores teóricos, obtenidos a partir de expresiones propuestas en el EUROCODIGO 5 y en [8]. Los autores encontraron diferencias significativas entre los valores de resistencia experimentales y los teóricos.

Ellos citaron que estas diferencias podrían originarse del hecho de que los modelos teóricos son basados en ensayos con maderas de baja densidad. En este tema, ellos resaltan la importancia de realizar nuevas investigaciones con maderas de alta densidad, para posibilitar las adecuaciones en los modelos teóricos existentes.

En 2004, en un estudio realizado con maderas brasileñas por [9], indica que no existe influencia significativa de la densidad de la madera en la resistencia al arrancamiento.

Delante de las consideraciones hechas por los autores citados, el objetivo principal de este artículo es evaluar el desempeño de 5 tipos de adhesivos estructurales, a través de ensayos de arrancamiento de barras de acero, pegadas en MPL de alta densidad, en la dirección normal a las fibras.

## 2. Materiales y Métodos

En este programa experimental fueron utilizados los siguientes adhesivos: resina epóxi de dos componentes Scuna 5100 (5100), Scuna masa para file taje con micro fibra vegetal (MFM), masa epóxi de dos componentes (ME), adhesivo epóxi de dos componentes A313 (A313) y adhesivo epóxi Sikadur 32 (SIKA32). Los primeros adhesivos son fabricados por Tubolit Ltda. y el ultimo por la Sika S.A. Según los fabricantes, el adhesivo Scuna 5100 es una resina epóxi de baja viscosidad, con dos componentes.

La Scuna masa para filetage es un adhesivo epóxi con consistencia de mayonesa y adición de micro fibra vegetal. La masa epóxi de dos componentes es un adhesivo de alta tixotropía. El adhesivo 313 es un epóxi con dos componentes para reparos variados. El sikadur 32 es un adhesivo estructural a base de resina epóxi, con dos componentes y de viscosidad media.

Para cada adhesivo fue ensayada una muestra compuesta por 6 cuerpos de prueba (CP) de MPL de *Eucalyptus Grandis* con dimensiones de (80 x 80 x 200) mm. Las barras de acero, para anclaje, fueron del tipo CA-50 con diámetros nominales de 10mm. Las larguras de anclaje fueron iguales a 10 veces el diámetro de las barras, como puede ser visto en la Figura 1, siguiéndose las recomendaciones del EUROCODIGO 5. Antes del fraguado del adhesivo, las extremidades de las barras fueron lijadas y limpiadas con productos de limpieza, para la remoción del polvo y residuos grasos.

Los orificios, en los CP's de madera, fueron hechos con taladro industrial, con diámetros medios de 11,0 mm [1].

Los adhesivos fueron mezclados y utilizados conformes las orientaciones de los fabricantes. Después de la mezcla, ellos fueron aplicados en las extremidades de las barras, con espátula. También fueron aplicados en los CP's de madera, hasta llenarse la mitad de los volúmenes de los orificios.

Todas la barras fueron pegadas en la dirección normal a las fibras de madera e introducidas con la ayuda de un martillo.

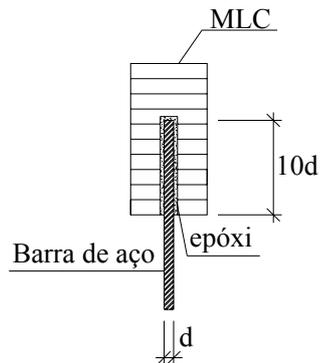


Figura 1. Cuerpo de prueba de MPL.

Después de pegar, los CP's fueron condicionados a la temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C y humedad relativa de  $(65 \pm 5)\%$ , hasta la fecha del ensayo de arrancamiento (Figura 2).



Figura 2. Condicionamiento de los cuerpos-de-prueba.

Para la ejecución de los ensayos fueron utilizados: una máquina universal EMIC DL300 (con capacidad de 300 kN) y accesorio para el ensayo de arrancamiento, como muestra la Figura 3. El deslizamiento relativo entre la barra de acero y el CP de madera fue medido a través de transductores de desplazamiento, con cursor de 50 mm. Los transductores fueron fijados en el accesorio del ensayo, como también puede ser visto en la Figura 3.

Las lecturas de carga y deslizamiento fueron realizadas a través del sistema de adquisición de datos de la máquina universal. Todos los ensayos fueron automatizados con el uso de un scrip (programa), lo que posibilitó su ejecución con control de desplazamientos. La velocidad adoptada para el ensayo fue de 0,05 mm/s.



Figura 3. Accesorios para el ensayo.

### 3. Resultados

La descripción de las muestras y los resultados de los ensayos esta presentada en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de arrancamiento de barras de acero ( $\Phi=10$  mm) pegadas en CP's de MPL

Amostra	CP's	Características CP's			Factor	Respuestas pesquisadas				
		P (mm)	U (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		Tipo de adhesivo	$(\gamma_i)$ (kN)	$\Delta$ (mm)	$(\bar{\gamma}_i)$ (kN)	s (kN)
A	1A	100	10,59	792,29	5100	50,54	2,49			
	2A	100	10,80	872,42	5100	47,14	2,11			
	3A	100	10,88	878,54	5100	48,67	1,32	48,71	1,46	3,00
	4A	100	11,93	797,52	5100	49,75	2,44			
	6A	100	10,56	802,05	5100	47,43	2,05			
	B	1B	100	10,37	723,16	MFM	36,05	1,20		
2B		100	10,55	773,41	MFM	46,53	1,78			
3B		100	10,48	818,48	MFM	39,36	1,72	41,31	3,91	9,47
4B		100	10,67	783,99	MFM	42,74	1,87			
6B		100	10,34	867,96	MFM	41,87	2,17			
C		1C	100	10,71	790,16	ME	42,62	3,02		
	2C	100	10,71	790,16	ME	46,81	3,41			
	3C	100	11,77	820,13	ME	35,19	1,28	40,73	3,88	9,53
	4C	100	10,66	724,69	ME	41,10	1,69			
	5C	100	11,02	842,66	ME	39,45	2,12			
	6C	100	11,45	787,61	ME	39,21	1,58			
D	1D	100	10,75	900,95	A313	20,23	0,92			
	2D	100	10,43	912,99	A313	18,78	1,11			
	3D	100	10,57	806,00	A313	22,02	0,82	20,07	2,16	10,76
	4D	100	10,62	755,29	A313	23,22	1,46			
	5D	100	11,03	918,09	A313	18,03	1,09			
	6D	100	11,17	908,65	A313	18,16	1,93			
E	1E	100	10,40	763,51	SIKA32	46,11	2,13			
	2E	100	10,71	747,81	SIKA32	33,28	1,67			
	3E	100	10,46	752,99	SIKA32	31,85	0,51	36,59	8,22	22,47
	4E	100	10,40	767,82	SIKA32	42,25	1,09			
	5E	100	10,67	718,82	SIKA32	41,84	1,53			
	6E	100	10,15	827,17	SIKA32	24,19	0,46			

En esta tabla:

P = profundidad de anclaje de la barra de acero;

U = contenido de humedad de la madera;  
 ρ = densidad aparente de la madera;  
 (y<sub>i</sub>) = Resistencia do CP al arrancamiento;  
 Δ = deslizamiento correspondiente a la fuerza máxima;  
 (ȳ<sub>i</sub>) = Resistencia media de la muestra;  
 s = desviación estándar de la muestra e  
 CV = coeficiente de variación de la muestra.

Los intervalos de confianza, asociados a los valores de resistencia media de arrancamiento, fueron determinados utilizándose la Ecuación 1. En esta ecuación, los valores de (t<sub>v</sub>) fueron adoptados de la distribución t de Student, considerándose un nivel de significancia de 0,05.

$$\bar{y}_i - t_v \times \frac{s}{\sqrt{N}} < \mu_i < \bar{y}_i + t_v \times \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

Siendo:

ȳ<sub>i</sub> = valor muestral de la resistencia media al arrancamiento;  
 (t<sub>v</sub>) = valor t de Student;  
 s = desviación estándar de la muestra;  
 N = tamaño de la muestra e  
 μ<sub>i</sub> = valor verdadero (poblacional) de la resistencia media al arrancamiento.

Los intervalos de confianza, calculados para las resistencias medias poblacionales, son mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Intervalos de confianza para las resistencias medias al arrancamiento de barras de acero (Φ=10 mm) pegadas em CP's de MPL

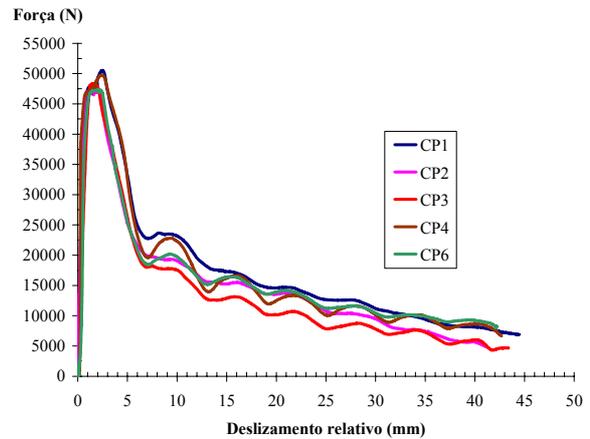
Tipo de adhesivo	Número de CP's (N)	Força média amostral (ȳ <sub>i</sub> ) (kN)	Força média populacional (μ <sub>i</sub> ) (kN)
5100	5	48,71	46,90 < μ <sub>A</sub> < 50,52
MFM	5	41,31	36,46 < μ <sub>B</sub> < 46,16
ME	6	40,73	36,66 < μ <sub>C</sub> < 44,80
A313	6	20,07	17,80 < μ <sub>D</sub> < 22,34
SIKA32	6	36,59	27,96 < μ <sub>E</sub> < 45,22

Los valores de las tablas de 1 y 2 indican que el mejor desempeño fue obtenido por los CP's con adhesivo 5100. Se observa que ellos presentaron una mayor resistencia media al arrancamiento y el menor intervalo de confianza asociado a este valor.

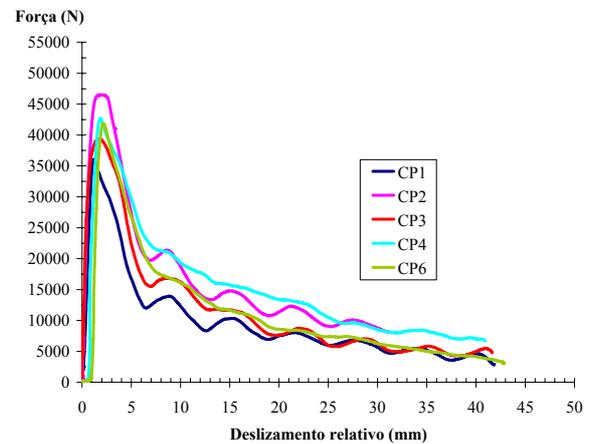
Todavía se puede observar, en la tabla 1, que la densidad de la madera varia entre los CP's. Esto es debido a la heterogeneidad de la madera inclusive en la propia especie, (un material biológico y anisotrópico). Se observa, también en esta tabla 1, que para valores mayores de densidad no resultan necesariamente en valores mayores de fuerza de arrancamiento.

Las curvas obtenidas de los ensayos, representativos de las fuerzas y los desplazamientos

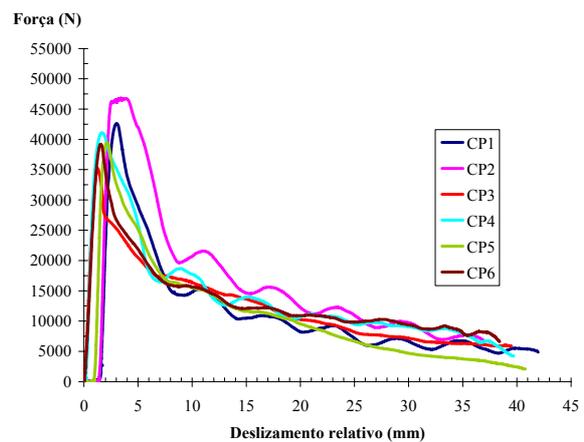
relativos entre las barras de acero y de los CP's de madera, son mostradas en las Figuras 4 hasta 8.



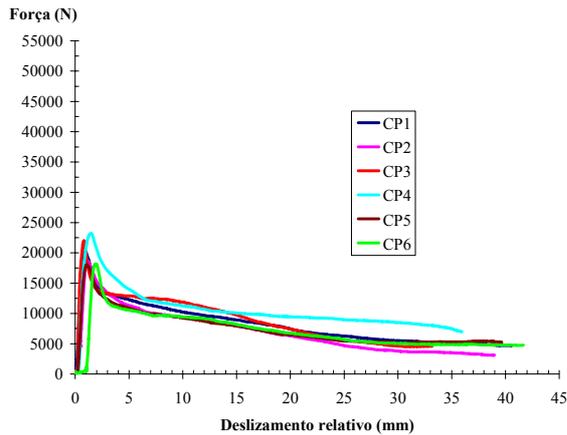
**Figura 4.** Curva Fuerza x deslizamiento relativo Adhesivo epóxi 5100.



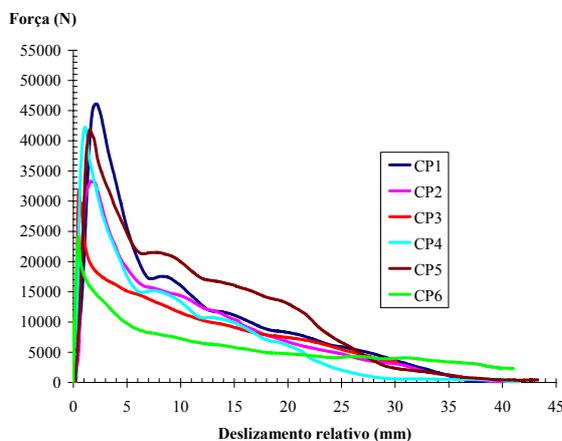
**Figura 5.** Curva Fuerza x deslizamiento relativo Adhesivo masa para filetagem com micro fibra.



**Figura 6.** Curva Fuerza x deslizamiento relativo Adhesivo masa epóxi.



**FIGURA 7.** Curva Fuerza x deslizamiento relativo Adhesivo epóxi A313.



**FIGURA 8.** Curva Fuerza x deslizamiento relativo Adhesivo sikadur 32.

Conforme puede ser visto en las Figuras 4 hasta 8, los resultados de los CP's con adhesivos epóxi 5100 muestran el comportamiento más homogéneo y una mayor rigidez hasta la carga máxima. Los CP's de todas las muestras presentan un comportamiento caracterizado por la disminución de la capacidad de la carga máxima, con un aumento de la deformación (*softening*) [2]. También puede ser observado que, con excepción de los CP's con adhesivos A313 y sikadur 32, la mayoría de los CP's presentan ciclos de ganancia de resistencia y pérdida de resistencia en los tramos finales de las curvas.

El modo de ruptura de todos los CP's pegados con resina epóxi 5100, fue caracterizado por el aplastamiento del adhesivo y su pérdida total de adherencia con la barra de acero, como puede ser visto en la Figura 9. Se observó, también que parte del adhesivo permaneció dentro del orificio, fuertemente adherida a la madera.

El modo de ruptura de todos los CP's pegados con adhesivo tipo masa para fileteado con micro fibra, también fue caracterizado por el aplastamiento del

adhesivo y su pérdida total de la adherencia con la barra de acero (Figura 10).

Los CP's pegados con masa epóxi, también presentan una ruptura caracterizada por el aplastamiento del adhesivo y su pérdida total de adherencia con la barra de acero (Figura 11).



**Figura 9.** Adhesivo 5100 – Modo de ruptura.



**Figura 10.** Adhesivo MFM - Modo de ruptura.



**Figura 11.** Adhesivo ME – Modo de ruptura.

Todos los CP's pegados con resina A313, presentan una pérdida total de la adherencia del adhesivo con la barra de acero y con las paredes del hueco, después de la ruptura. Como puede ser visto en la Figura 12, el adhesivo A313 formó una película deformable al rededor de las barras de acero.



Figura 12. Adhesivo A313 - Modo de ruptura.

El modo de ruptura de todos los CP's pegados con Sikadur 32, fue bien diferente de la ruptura de las demás muestras. Las características principales fueron la pérdida total de adherencia del adhesivo con la pared del orificio y la fuerte adherencia del adhesivo con la barra de acero como muestra la Figura 13.



Figura 13. Adhesivo SIKA32 - Modo de ruptura,

#### 4. Conclusiones

Considerando que todas las propiedades geométricas de las uniones fueron mantenidas constantes, la resistencia al arrancamiento y el modo de ruptura se muestran considerablemente influenciados por el tipo de adhesivo.

A pesar de las variaciones de la densidad de la madera, esta no tuvo influencia significativa en la resistencia al arrancamiento, confirmando lo que ya había sido observado por [9].

El adhesivo con mejor desempeño fue el epóxi Scuna 5100, una vez que el presente el mayor valor de resistencia media al arrancamiento y las menores variaciones en su comportamiento.

Es interesante resaltar que, considerando que todos los adhesivos son a base de resina epóxi, ellos presentan desempeños diferenciados.

Otra consideración importante es que, mismo adoptándose las mismas distancias mínimas de anclaje propuestas por el EUROCODIGO 5, se verificó que las rupturas fueron por la pérdida de adherencia del adhesivo con la barra de acero o con la madera. De esta forma, no fue atendida la expectativa de que la distancia mínima de anclaje limitará la capacidad de carga por la resistencia de la barra, posibilitando una ruptura dúctil.

#### 5. Agradecimientos

Nuestros sinceros agradecimientos a CAPES, por la concesión de la beca de estudios; a la FAPEMIG y la FINEP, por la disponibilización de recursos para la compra de materiales y equipamientos, y a Tubolit Ltda por la donación de los adhesivos.

#### 6. Referencias

- [1] Serrano, E., "Glued-in rods for timber structures - a 3D model and finite element parameter studies, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21 (2): 115-127, april 2001.
- [2] Serrano, E., "Glued-in rods for timber structures - An experimental study of softening behaviour", *Materials and Structures* 34 (238): 228-234, may 2001.
- [3] Feligioni, L., Lavischi, P., Duchanois, G., et al., "Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods", *Holz als Roh-und Werkstoff* 61 (4): 281-287, july 2003.
- [4] Del Senno, M., Piazza, M., Tomasi, R., "Axial glued-in steel timber joints - experimental and numerical analysis", *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62 (2): 137-146 april 2004.
- [5] Gardelle, V., Morlier, P., "Geometric parameters which affect the short term resistance of an axially loaded glued-in rod", *Materials and Structures* 40 (1): 127-138, jan-feb 2007.
- [6] Steiger, R., Gehri, E., Widmann, R., "Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain", *Materials and Structures* 40 (1): 69-78, jan-feb 2007.
- [7] Cimadevila, J.E., Rodriguez, J.A.V., Otero Chans, M.D., "Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27 (2): 136-144, mar 2007.
- [8] Riberholt, H., "Glued bolts in glulam- Proposal for CIB Code", *CIB-W18 Meeting*. Parksville, Vancouver Island, Canada, 1988.