



## II Convención Internacional de Ciencias Técnicas



### Consolidación de elementos estructurales históricos en madera con particular atención al comportamiento antisísmico, utilizando bio-resinas y tejidos naturales.

### Consolidation of historic wooden structural elements with particular attention to anti-seismic behavior, using bio-resins and natural textiles.

M. Paradiso Antonelli <sup>1</sup> and E. Perria Lombardo <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Arquitectura DiDA, Universidad de los Estudios de Florencia, Italia, michele.paradiso@unifi.it

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental DiCeA, Universidad de los Estudios de Florencia, Italia, elena.perria@dicea.unifi.it

*Abstract*— The present investigation started in the year 2011; since that time the authors collaborate in a no-profit project with the Archbishopric of Santiago de Cuba in the consolidation of the wooden dome of Santiago de Cuba's cathedral (2011-2016). The aim is the preservation of the historical frame of the *media naranja* (the dome). The idea was to avoid the demolition and replacement of the wooden arches, made of shorter timbers elongated by the *Jupiter Joint* carpentry connection, and propose a consolidation technique using natural textiles and resins. The challenge is the preservation of the old frame achieving a good compromise between conservation of the built heritage and a good seismic performance. The research, still in progress, is developed in the structural testing laboratory for wooden constructional elements in the Faculty of Engineering Structures of the *Hochschule für Angewandte Kunst und Wissenschaft, Hildesheim (Germany)*. The paper presents the first results of these studies. The behaviour of the wooden connection is first characterized in static conditions, before come along with the study of the same reinforced joint. As a result, the static behaviour of a carpentry connection depends not only on the kind of connection, but also on the geometry, number and inclination of the surfaces. These observations are much more important in case of curved wooden beams, like the Santiago's Cathedral ones, because there, the inclination of the axis decisively influences the transmission of forces from one to the other side of the jointed beam.

*Keywords*—historical heritage, wood, Jupiter joint, natural fibers, consolidation

## I. INTRODUCCIÓN

La Catedral de Santiago de Cuba ha sido restaurada a lo largo de casi cinco años con un trabajo conjunto del Arzobispado de Stgo de Cuba y de la O.C.C. En septiembre

de 2015, al interior del monumento finalmente terminado, Papa Francisco celebró la última misa de su primera visita en Cuba. Durante todas las fases de restauración el Departamento de Arquitectura DiDA de Florencia (Italia) asesoró la parte referida a los aspectos de consolidación estructural del monumento.

Los avances de la investigación se reportan en libros y participaciones a congresos internacionales [1, 2, 3, 4, 5]. Particularmente, en [3] y [4] se analizó el comportamiento de la estructura de la Catedral bajo la acción dinámica de terremotos, ciclones y huracanes, utilizando el código a elementos finitos Straus7, considerando las condiciones efectivas de la estructura de la época, cuando los trabajos de consolidación no habían empezado.

Los resultados de aquella investigación indicaron que los campanarios, restauradas a principios del siglo XIX con estructura en hormigón, eran los elementos más débiles. El hecho se confirmó en octubre de 2012 cuando el devastador ciclón Sandy tumbó las linternas de los campanarios y destruyó el andamio de madera del exterior de la cúpula, sin afectar de manera significativa la estructura en madera de la *media naranja*. Se demostró entonces la eficacia de la construcción original en madera.

El análisis previo mostró que la parte más deteriorada de la estructura fueran las cuarenta cuadernas de madera que componen la cúpula, afectadas por humedades y con consecuente pérdida de sección resistente. La restauración se concentró entonces en las cuadernas y los empalmes a *rayo de Júpiter*, que unen casa una de las piezas. Se decidió restaurar la parte estructural basándose en la técnica de *anastylosis* (Carta de la Restauración de Atenas, 1932), lo que obligó a una reconstrucción completa de las mismas.



Fig. 1 Catedral después del Sandy



Fig. 2 Esqueleto de la cúpula



Fig. 3 Cuaderna desmontada a pie de obra

Fue en esa ocasión que los autores decidieron empezar una campaña de investigación sobre este tipo de conexión histórica, dirigida primeramente a conocer el comportamiento estructural del *rayo de Júpiter* bajo acciones estáticas, con la posibilidad de utilizar resinas y tejidos naturales para la consolidación, de manera que se pudiera conservar el elemento histórico, garantizando también una buena *performance* a las acciones dinámicas. Es bien sabido que los materiales biológicos garantizan la compatibilidad con la madera y el respeto del medioambiente. Particularmente, las resinas naturales como las epóxicas derivadas de aceites vegetales, entre otras características, tienen una resistencia química excelente, una óptima viscosidad, una alta capacidad de procesamiento,

son biodegradables, y derivan de los elementos residuales del sector agroalimentario. Y las fibras naturales, como las de yuta y lino, soportan una tensión última de ruptura parecida a la de la fibra de vidrio, tienen una baja densidad, una buena termo conductividad, y son materiales reciclables.

En realidad la literatura técnica no ofrece mucho sobre el comportamiento estructural del nudo a *rayo de Júpiter*. En la literatura técnica, así como en las normas europeas para construcciones en madera (*Eurocódigo 5*), no se da una aclaración sobre los modos de falla y las cargas que estas conexiones de carpintería puedan soportar [6]. Fue por lo tanto necesario y obligatorio empezar por el estudio de un *empalme a media madera con testa en sesgo*, que simplificase la geometría del *rayo de Júpiter*. Es más, sin considerar los tornillos que normalmente se usan en este tipo de nudo, considerados como un refuerzo para la conexión. En la literatura y en estudios previos se considera este tipo de empalme como una *bisagra*, capaz de transmitir solamente compresión pura. En realidad el corte y la inclinación de las caras que componen el empalme influyen la posición del centro de presión de las fuerzas internas y someten la madera a compresión y a flexión.

La presente investigación sigue como objetivo principal investigar el comportamiento del nudo al variar las cargas aplicadas (compresión pura, flexión pura y combinación de los dos), y esfuerzos internos transmitidos por las caras de la conexión, diagramando al final la interacción N-M por dos geometrías de referencia.

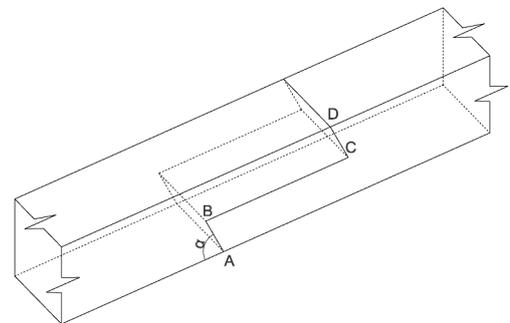


Fig. 4 Empalme a media madera con testa en sesgo

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología adoptada es el método científico, basado sobre la formulación de la teoría, una campaña de ensayos experimentales en laboratorio, medición, observación, y por lo tanto verificación y modificación de las hipótesis iniciales. La formulación inicial sobre el comportamiento estático del nudo es constantemente verificada con las pruebas experimentales y sus mediciones. La comparación continua entre el modelo analítico y la evidencia de los resultados experimentales, produjo ajustes para el modelo

estático. Todos los cálculos y las pruebas experimentales han sido preparadas de acuerdo con el Eurocódigo 5. .

Durante la conducción de las pruebas experimentales, se observó que la conexión tenía un comportamiento geométrico no-lineal. Frente a la complejidad de la realidad, se decidió simplificar el comportamiento de la estructura en una sucesión de modelos estáticos lineales, donde se describían los instantes de cargas a través de parámetros apropiados. El modelo estático desarrollado, está descrito y validado en [7], donde se detalla la metodología de investigación que atañe la aplicación de herramientas para simplificar la realidad y garantizar la viabilidad del modelo analítico propuesto.

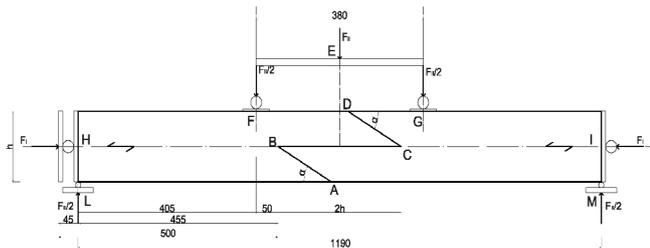


Fig. 5 Instalación del espécimen

La máquina de ensayo utilizada es una combinación de dos subsistemas, dos gatos hidráulicos, uno para la aplicación de cargas verticales y otro para las cargas horizontales. Los dos pistones se mueven de forma independiente respectivamente en dirección vertical, arriba-abajo ( $F_I$ ), y horizontal, izquierda-derecha ( $F_{II}$ ) en un guía lineal. El Pistón I se utiliza para la aplicación de *cargas axiales* ( $F_{aplicada} = F_I$ ) y el Pistón II para la aplicación de *momento flexor* ( $F_{aplicada} = F_{II}$ ). La fuerza se ejerce sobre la muestra de ensayo por medio de cabezas móviles fijadas al marco fijo. La cabeza del Pistón II está dotada de una cabeza especial para la aplicación de momento de flexión. Los procedimientos de ensayo son dos.

**P1:** La aplicación de la carga según este procedimiento se describe como aplicación consecutiva y separada de carga por medio del Pistón I y Pistón II. Ambos pistones trabajan con *modo de tensión controlada* (*load or stress-controlled mode*). La relación entre la fuerza aplicada  $F_{II}$  y el momento flexor  $M$  y la relación entre la fuerza aplicada  $F_I$  y la fuerza normal  $N$ , se definen en las siguientes (1) y (2).

$$N = F_I \quad (1)$$

$$M = \frac{F_{II} \cdot FH}{2} \quad (2)$$

**P2:** La aplicación de la carga según este procedimiento se describe como aplicación consecutiva y separada de carga por medio del Pistón I con *modo de tensión controlada* (*load or stress-controlled mode*) y Pistón II con

*modo de desplazamiento controlado* (*displacement-controlled mode*). La fuerza  $F_I$  se aplica hasta el valor elegido de  $F_{target}$ , después, se aplica la  $F_{II}$  hasta la falla de la muestra. Durante la carga del Pistón 2, el *modo de desplazamiento controlado* del gato hidráulico ajusta constantemente el valor elegido de  $F$  ( $F_{target}$ ). La relación entre la fuerza aplicada  $F_{II}$  y el momento flexor  $M$  y la relación entre la fuerza aplicada  $F_I$  y la fuerza normal  $N$ , se definen también según (1) y (2).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las siguientes Figura 6 y Figura 7, se resumen los resultados del comportamiento del *empalme a media madera con testa en sesgo* con inclinación del sesgo  $\alpha = 30^\circ$  y  $\alpha = 60^\circ$ .

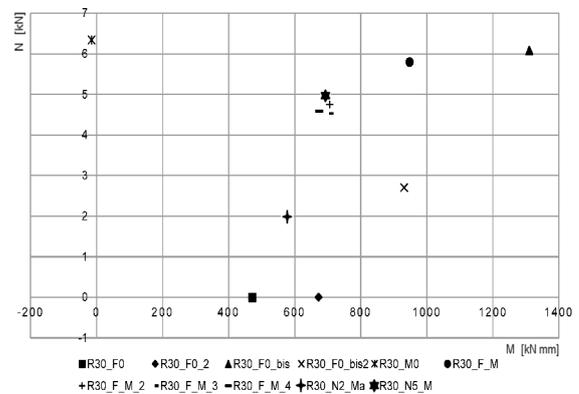


Fig. 6 N-M curva de interacción para el ángulo  $\alpha = 30^\circ$

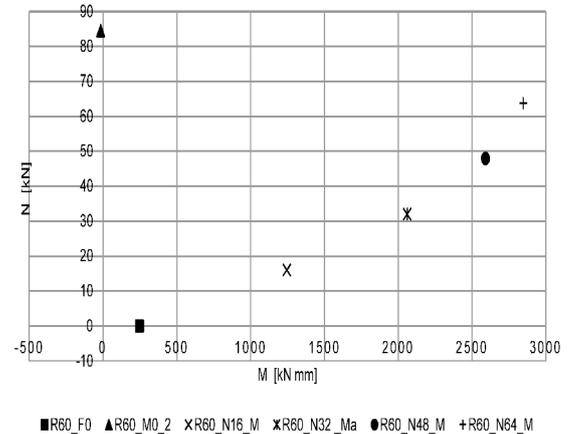


Fig. 7 N-M curva de interacción para el ángulo  $\alpha = 60^\circ$

Los modos de fallo son cuatro:

- I. Compresión en las caras AB y CD
- II. Esfuerzo cortante/tensión perpendicular a las vetas en el punto B
- III. Esfuerzo cortante/tensión perpendicular a las vetas combinado en los puntos B y C
- IV. Pandeo

Durante las pruebas experimentales se registraron sólo tres modos de fallo de los cuatro supuestos en el modelo analítico (Figura 8).

El modelo estático proporciona cuatro estados límites (LS) que reflejan los tres modos de fallo observados durante la campaña experimental:

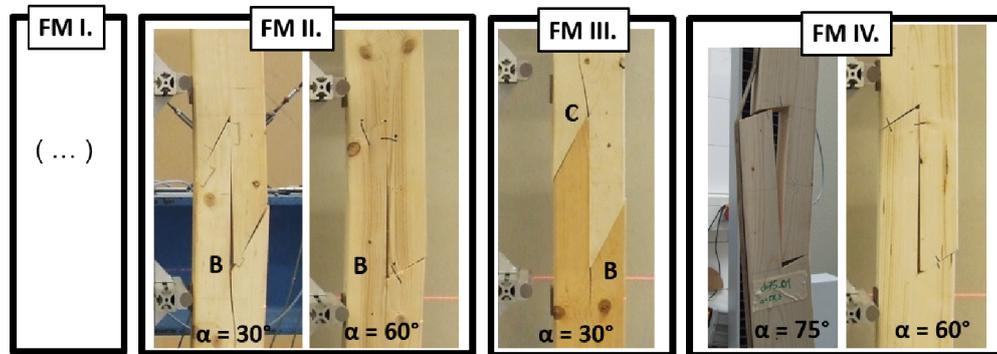


Fig. 8 Diagnóstico del modo de falla (de izquierda a derecha): FM I: no se registró este modo de falla. FM II: muestra R30\_F0  $\alpha=30^\circ$  20/01/2016 flexión pura; muestra R60\_F64\_M  $\alpha=60^\circ$  01/02/2016 flexión + compresión. FM III: muestra R30\_M0  $\alpha=30^\circ$  20/01/2016 – compresión pura. FM IV: muestra  $\alpha=75^\circ$  compresión + flexión  $a=58,3$  05/06/2015; muestra R60\_F0  $\alpha=60$  flexión pura.

#### IV. CONCLUSIONES

La capacidad de carga de una estructura depende tanto del material, cuanto del mecanismo de transferencia de cargas en la estructura como de la entidad de las cargas. La madera, material ortótropo, no garantiza la homogeneidad de los resultados; por esta razón, la campaña experimental [7] fue desarrollada en primer lugar utilizando artificios que simplifican la interpretación de los resultados.

Teniendo en cuenta el comportamiento general del empalme a media madera con testa en sesgo, hasta este punto de la investigación [8] no es posible dar una descripción general del comportamiento del nudo sólo basándose en la interacción F-M. En efecto, el comportamiento de la conexión, es muy diferente, desde la respuesta a la carga aplicada, a los modos de fallo y la capacidad de carga. Estos factores que son notablemente diferentes en función de la geometría, están influenciados por la inclinación del sesgo, por el tipo de condición de carga, y finalmente por el posicionamiento de las fuerzas externas respecto a la geometría correspondiente.

- El mecanismo de carga principal de la conexión se ve influenciado por la geometría de la conexión. La comparación entre los ángulos muy agudos y ángulos más grandes, demostraron la evidencia de esta afirmación.
- Por último, la carga es un factor importante a tener en cuenta en la predicción del modo de fallo y la capacidad de carga del nudo. El *loading path* seguido por los

LS1: Estado límite de equilibrio. Los parámetros que llevan al fallo son parámetros geométricos.

LS2 y LS3: Estado límite asociado con el FM esfuerzo cortante/tensión perpendicular a las vetas. Los modos de fallos asociados con el LS2 y LS3 son respectivamente el FM II y FM III. Los parámetros críticos que llevan al fallo son la resistencia y rigidez del material y parámetros geométricos.

especímenes cargados en compresión pura es muy diferente del recorrido seguido por los especímenes cargados en flexión pura.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del laboratorio de pruebas experimentales en madera LHT de la Universidad Práctica (HAWK) en Hildesheim, Alemania, en particular a sus técnicos y carpinteros que siempre trabajaron de forma diligente y puntual para cumplir con los ensayos; y la colaboración del Instituto de Construcciones en Madera de la Universidad Técnica TU Braunschweig, Alemania, por todo el aporte.

#### REFERENCIAS

1. Paradiso M, Milani P et al. (2011) *Atlas del patrimonio arquitectónico y cultural del casco histórico de Santiago de Cuba*. Edición Medina, Borgo San Lorenzo.
2. Paradiso M, Tempesta G et al. (2012) *The dome of the Cathedral of Santiago de Cuba: degradation and consolidation*, Proc. vol 1, Int. Conf. Domes in the world, Nardini editore, Firenze, Italy. pp. 215-228.
3. Paradiso M, Tempesta G et al. (2012), *Static and antiseismic behaviour of the Cathedral of Santiago de Cuba*, SISMOS 2012 Proc., IV Int. Conf. on Danger, Geologic Risk and Seismic Disasters, Ediciones UO, Stgo de Cuba, Cuba, 2012, cd-rom.
4. Paradiso M, Tempesta G et al. (2012), *Degradation and consolidation of the Cathedral of Santiago de Cuba*, SAHC 2012 Proc., Int. Con. on Structural Analysis of Historical Construction, Jerzy Jasienko Ed., Breslavia, Poland, 2012, pp. 508-516.
5. Paradiso M, Perria E et al. (2013), *La Catedral de Santiago de Cuba como ejemplo emblemático de la difusión de saberes entre Europa y*

- Latino-América*, CNHC 2013 Proc. Vol. 2, Congreso Nacional de la Historia de la Construcción, Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid, Spain.
6. Eurocode 5, Design of timber structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1:2004.
  7. Perria, E., Paradiso M., Kessel M.. (2016) *Experimental verification of the static model for the characterization of the halved and undersquinted scarf connection*. In: Proc. of 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, *in press*, Leuven, Belgium.
  8. Perria, E., Paradiso M., Kessel M., Sieder, M.. (2016) *Characterization of the halved and undersquinted scarf carpentry connection*. In: Proc. of WCTE 2016, World conference on Timber engineering, *in press*, Vienna, Austria.