



ID: XXXVIIIJSIE-07-001

DESARROLLO DE UNA CUBIERTA PLEGADA CON TABLEROS CONTRACHAPADOS. DISEÑO PARAMÉTRICO Y FABRICACIÓN DIGITAL

DEVELOPMENT OF A FOLDED ROOF WITH PLYWOOD BOARDS. PARAMETRIC DESIGN AND DIGITAL MANUFACTURING

Juan José Fontana (P) (1); Marina Piñeyro (2); Paulo Pereyra (3); Claudia Chocca (4)

(1) Arquitecto, Doctor, Prof. Titular del Instituto de Tecnologías (IT), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU), Universidad de la República (Udelar), Uruguay. (2) Arquitecta, Ayudante del IT, FADU, Udelar, Uruguay. (3) Arquitecto, Prof. Adjunto del Centro de Integración Digital (CID), FADU, Udelar, Uruguay.

(4) Arquitecta, Magíster, Prof. Adjunto del IT, FADU, Udelar, Uruguay.

Dirección para correspondencia: juanjosefontana@fadu.edu.uy; (P) Presentador

Área Temática: Diseño y Construcción de Estructuras.

Resumen

Con el objetivo de definir un procedimiento de modelado paramétrico y fabricación asistida por computadora de estructuras laminares con materiales derivados de la madera y formas complejas, se desarrolló un proyecto ejecutivo y un prototipo de una cubierta para un edificio educativo. Para ello, se realizaron experimentos de *form finding* con el objetivo de encontrar formas apropiadas para la construcción de estructuras laminares, que se ajustaron aplicando factores de optimización atendiendo a la materialización, a las solicitaciones físicas, a la coordinación con los distintos aspectos constructivos y a los procesos de fabricación. Se utilizaron los programas Rhinoceros, Grasshopper y RFEM. Se fabricó un prototipo a escala 1/6 de la cubierta en el *Laboratorio de Fabricación Digital* de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) y se trazó una curva de deformación en función de la carga aplicada sobre el modelo. Los ensayos de las propiedades mecánicas del material y del modelo fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos de la FADU. Finalmente, se analizó el desempeño estructural de la cubierta a través de correlaciones entre dos modelos de cálculo teórico y los resultados de los ensayos. El desarrollo de una metodología CAD-CAE-CAM propia para la fabricación de cubiertas laminares, creemos que permitirá a la FADU ofrecer un servicio productivo a nuestro medio, así como promover el uso de materiales nacionales derivados de la madera.

Palabras-clave: estructuras laminares, *form finding*, método CAD-CAE-CAM, origami, prototipo.

Abstract

In order to define a procedure for parametric modeling and computer-assisted manufacturing of laminar structures with timber boards and complex shapes, a project and a prototype of a roof for an educational building were developed. Form finding experiments were carried out with the aim of finding appropriate forms for the construction of laminar structures, which were adjusted by applying optimization factors based on materialization, physical demands, coordination with different construction aspects and the manufacturing processes. Rhinoceros, Grasshopper and RFEM were used. A 1/6 scale prototype of the roof was manufactured in the Digital Fabrication Laboratory of the Faculty of Architecture, Design and Urbanism (FADU) and a deformation curve was plotted based on the load applied to the model. The tests of the mechanical properties of the material and the model were carried out in the FADU Testing Laboratory. Finally, the structural performance of the roof was analyzed through correlations between two theoretical calculation models and the test results. We believe that the development of our own CAD-CAE-CAM methodology for the manufacture of laminar roofs will allow FADU to offer a productive service to our environment, as well as promote the use of national timber.

Keywords: laminar structures, *form finding*, CAD-CAE-CAM method, origami, prototype.



1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas han aparecido en el mundo una gran cantidad de estructuras de formas complejas, que buscan aprovechar al máximo las propiedades de los materiales que la tecnología actual permite diseñar y producir, entre los que se encuentran aquellos derivados de la madera. El avance de los métodos de modelado paramétrico y de fabricación asistida por computadora, o métodos CAD-CAE-CAM, ha vuelto posible el diseño y la elaboración de componentes constructivos optimizados, imposibles de desarrollar con métodos tradicionales, al permitir una fuerte reducción de costos de mano de obra y de tiempos de producción. Las máquinas de corte controladas por computadora, las impresoras 3D y los programas informáticos de modelado y de cálculo estructural, son cada vez más potentes, y a costos que resultan rápidamente amortizables brindan prestaciones impensables unas pocas décadas atrás. Por este motivo, es previsible un inminente auge en Uruguay de estos métodos. Es previsible, a su vez, que el costo de la maquinaria disminuya en el corto y mediano plazo, por lo que resultará cada vez más atractivo disponer de esta tecnología que permite la fabricación de componentes con formas complejas en plazos muy reducidos y sin la participación de mano de obra especializada. El potencial plástico de este tipo de estructuras es indudable, por otra parte. Sin embargo, no existen al día de hoy en nuestro país aplicaciones prácticas relevantes en la industria de la construcción. Por este motivo se considera imprescindible desarrollar metodologías adaptadas a nuestro medio, a nuestras necesidades edilicias, a los materiales nacionales, a nuestra disponibilidad tecnológica, y a los costos locales de construcción.

2. METODOLOGÍA

A partir de experimentos de *form finding* analógicos con técnicas de origami y de *form searching* con Rhinoceros, Grasshopper y RFEM, se encontraron formas idóneas para la construcción de cubiertas laminares que fueron optimizadas atendiendo a criterios constructivos, estructurales y productivos. Para los modelos estructurales teóricos se utilizaron las propiedades mecánicas de tableros contrachapados de fabricación nacional obtenidas a través de ensayos, siguiendo los documentos de la Asociación Española de Normalización (2006, 2016a). A partir de una de las formas encontradas y optimizadas se desarrolló el proyecto de un Aula de Educación Inicial con estructura de tableros contrachapados. Se realizó un primer prototipo a 1/10 y finalmente otro a 1/6 que fue sometido a una prueba de carga. La fabricación y el montaje de estos modelos fueron realizados en el Centro de Integración Digital y los ensayos de los tableros, así como la prueba de carga del prototipo, en el Laboratorio de Ensayos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU). Se compararon, finalmente, los resultados obtenidos en la prueba de carga con el comportamiento teórico de dos modelos en RFEM.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Modelado de la cubierta

Para la generación de la geometría de la cubierta se realizaron experimentos de *form finding* con papel utilizando una sucesión de pliegues de origami en V a modo de valles y montañas. Si estos pliegues son regulares, se configura una superficie plana. Para poder generar cambios de pendientes y asegurar la correcta evacuación del agua de lluvia de la cubierta, se realizaron ajustes manipulando los ángulos de los pliegues. El plegado fue también simulado con

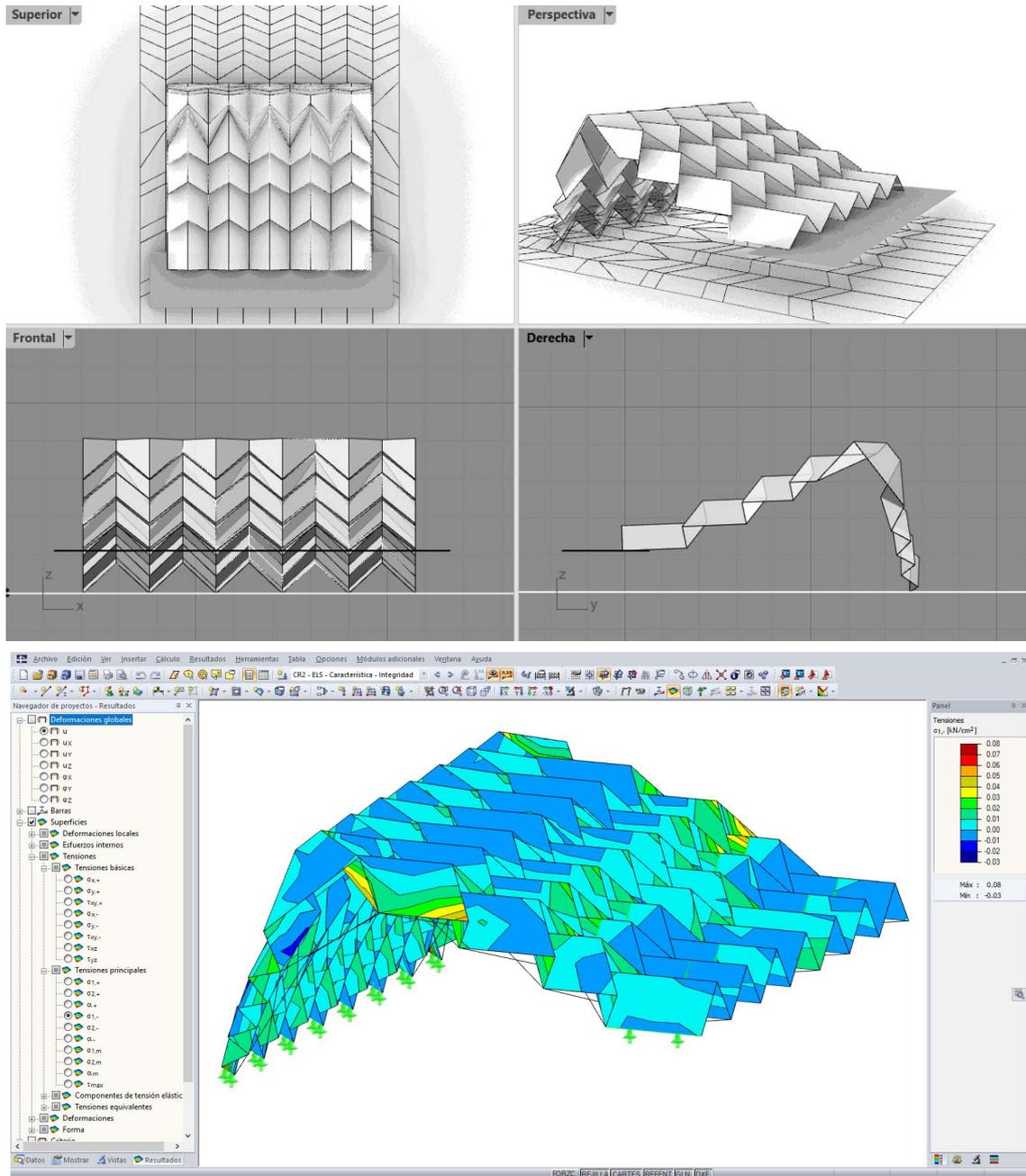
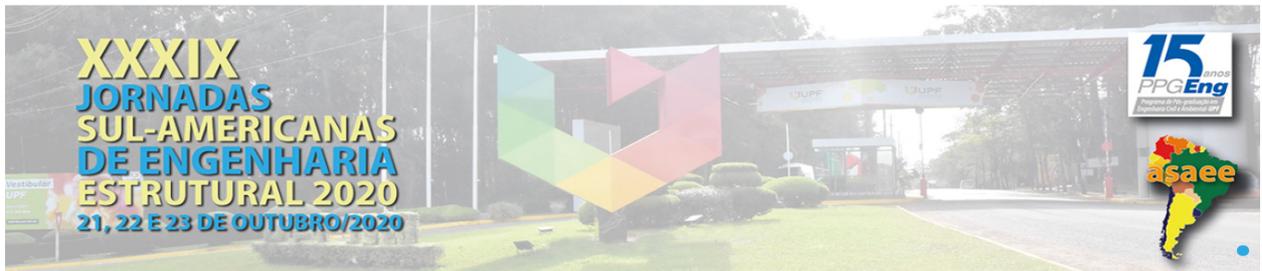


Figura 1. Iteraciones en el proceso de definición de la forma plegada de la cubierta, utilizando Rhinoceros y RFEM.

el programa Rhinoceros 3D que cuenta con el plug-in Grasshopper, que permite una primera parametrización general de la forma. Se introdujeron en ese momento condicionante dimensionales tales como las cotas de apoyo y se exportó la geometría a RFEM para analizar su comportamiento mecánico. Este procedimiento permite realizar exploraciones iterativas de modo de ajustar la forma y su patrón de plegado, a la vez que incorporar elementos auxiliares como cruces inferiores de rigidización. Se buscó optimizar el uso de los tableros contrachapados de



2,40 m x 1,20 m, por lo que se limitaron las dimensiones de las piezas de la cubierta a 2,30 m x 1,10 m previendo un margen de posicionado en la cama de corte. El espesor teórico calculado para la estructura laminar de la cubierta final fue de 54 mm, con tableros contrachapados de la clase F20/15 E30/25. En la figura 1 se ilustran algunas de las iteraciones realizadas.

3.2. Parametrización ajustada del modelo y Fabricación digital

Las variables fundamentales de la parametrización ajustada son las dimensiones de los faldones y sus separaciones, los espesores de las distintas piezas, el diámetro de los tornillos de fijación, las separaciones entre fijaciones y sus distancias a los bordes de los tableros y de las placas de unión. Para estas últimas, se siguieron las recomendaciones del Eurocódigo 5 (Asociación Española de Normalización, 2016b).

Por fabricación digital se entiende al sistema integrado por tecnologías, técnicas y procedimientos, software, hardware, firmware, materiales y transductores que posibilitan la materialización de una forma proyectada. Se fabricó un primer modelo a escala 1/10 con faldones de MDF de 5,5 mm de espesor nominal y conectores impresos con filamento termoplástico PLA (ácido poliláctico) de 2,75 mm de espesor, que ayudó a anticipar problemáticas específicas que pueden surgir en la preparación, mecanización y armado del prototipo final, tales como las holguras dimensionales necesarias para el montaje, las posibles incongruencias en los encuentros entre placas y conectores, y la identificación, indexación y posicionamiento de los distintos elementos. Los faldones se fabricaron con tecnología sustractiva empleando la técnica de corte láser mediante CO₂. Finalmente, se fabricó y montó el modelo a escala 1/6 con placas de contrachapado de 9 mm de espesor nominal, conectores de doble chapa de acero inoxidable de 1 mm de espesor y tornillos de 3 mm de diámetro con tuerca y arandela. Fue necesario utilizar tecnologías sustractivas a través de sistemas automatizados por control numérico computarizado de corte láser para la fabricación de los conectores metálicos y de un router con fresa para el corte de las placas de contrachapado.

Las etapas de este proceso de diseño paramétrico y fabricación digital, que se retroalimentan iterativamente a través de instancias de ensayo y error, se ilustran en la figura 2.

El pasaje de la parametrización a la mecanización se denomina como mecanizado e involucró un conjunto de operaciones. En primer lugar, la generación de una base de datos gráfica, diagramada en un formato coincidente con las dimensiones del hardware de operación y organizado en capas de acuerdo a las operaciones implicadas. A continuación, fue necesario verificar la planeidad de las figuras generadas y controlar las entidades organizadas en capas y unidades de referencia.

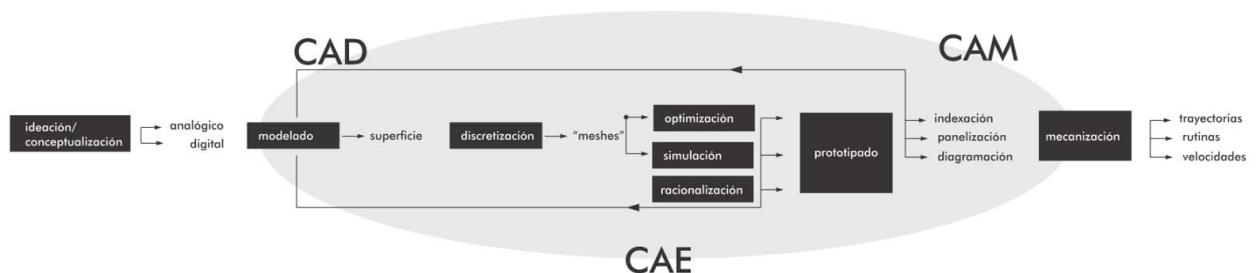


Figura 2. Esquema del proceso de diseño paramétrico y fabricación digital utilizado.



Esta serie de controles permitió obtener la geometría plana en un formato de intercambio binario y exportarla a un sistema CAM. Esta exportación requirió de la sistematización de la información geométrica procesada, articulada en un sistema congruente de unidades, planos de referencia y organización por capas. La articulación se conceptualiza como una base de datos gráfica, ya que es menester estructurar cada proceso de mecanizado en etapas coherentes al tipo de operación involucrada. Finalmente, se definió el mecanizado, es decir, se tradujo cada figura geométrica en términos de velocidades, trayectorias y profundidades de traza en forma incremental. La exportación de información digital implica un diálogo con el hardware de la tecnología de fabricación digital que se instrumentaliza a través del firmware. Se utilizaron en este proceso Rhinoceros y Cambam, 6 impresoras 3D, 2 cortadores láser y un router CNC.

3.3. Montaje del prototipo y prueba de carga



Figura 3. Montaje del prototipo a escala 1/6.

En la figura 3 se ilustra el proceso de montaje del prototipo a escala 1/6 y en la figura 4 la prueba de carga, junto con las deformaciones teóricas de dos modelos del prototipo en RFEM.

Las deformaciones medidas en la prueba de carga resultaron superiores a las esperadas de acuerdo a los modelos teóricos realizados: uno con uniones rígidas entre placas (modelo rígido) y otro alternando uniones rígidas con uniones articuladas (modelo semirígido), ver figura 5. No fue posible analizar un modelo teórico con uniones exclusivamente articuladas ya que resulta inestable. En el primer escalón de carga la deformación del prototipo resultó casi el triple que la del modelo semirígido.

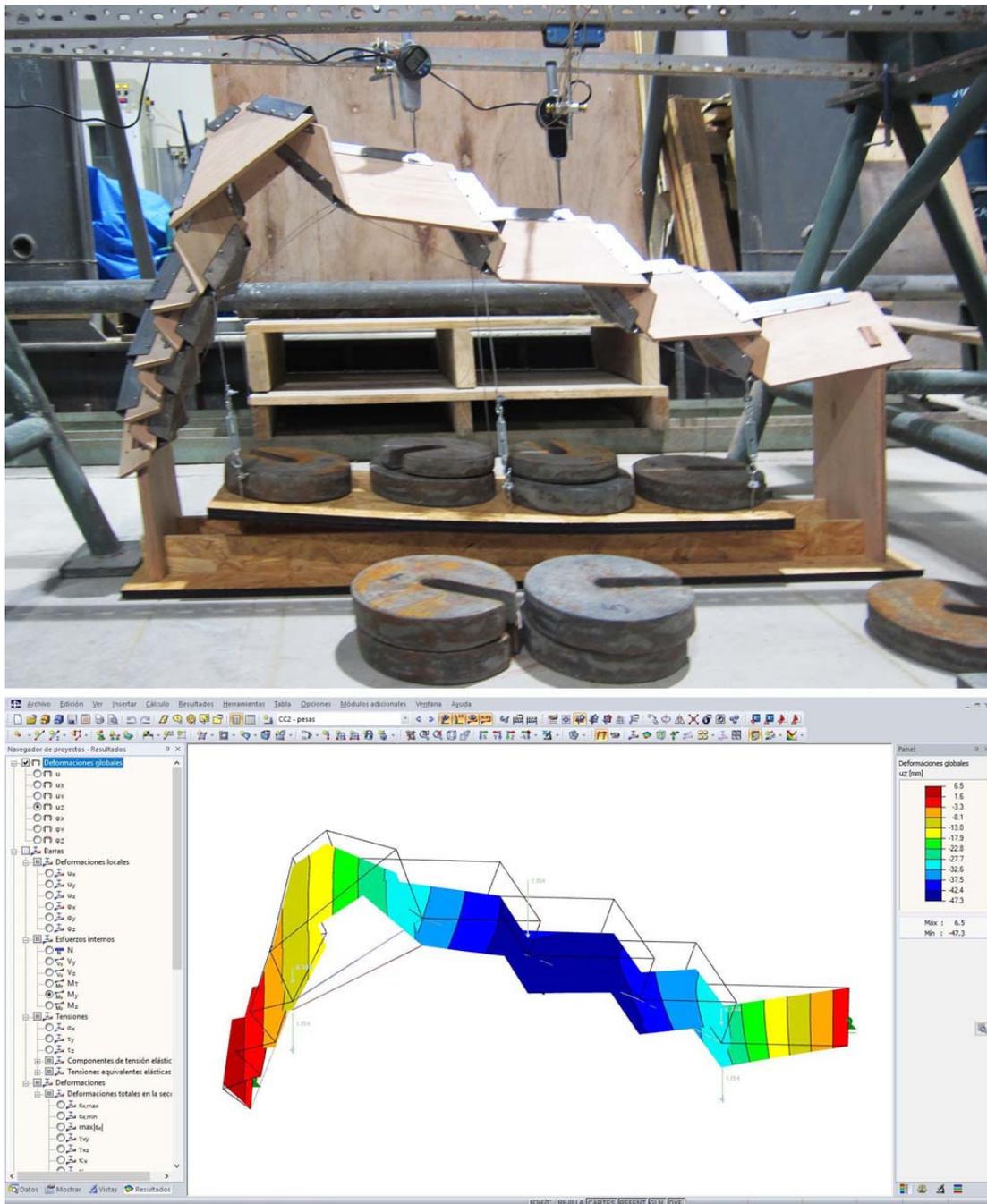


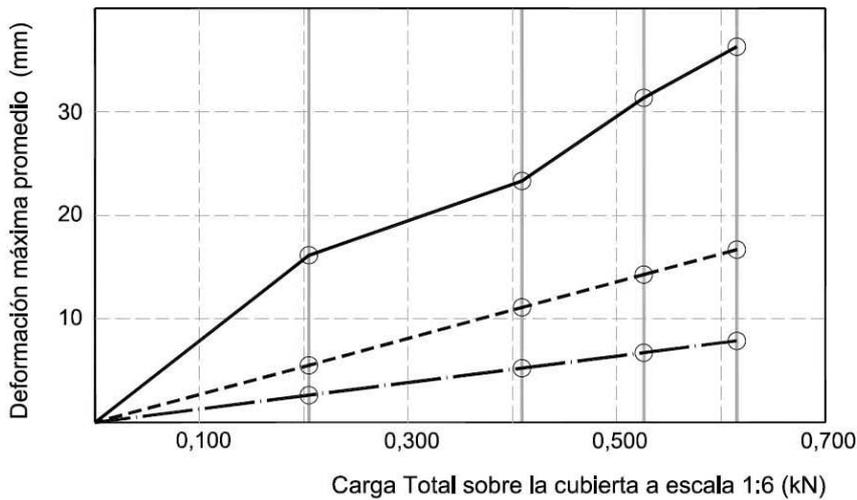
Figura 4. Prueba de carga del prototipo a escala 1/6 y deformaciones en el eje z de un modelo teórico del prototipo en RFEM.

En el segundo escalón, luego del acomodamiento inicial, la deformación del prototipo fue un 29% mayor que la de dicho modelo. En el tercer escalón fue un 153% mayor y en el cuarto, un 105% mayor. Las deformaciones del modelo semirígido, por otra parte, resultaron siempre 2,12 veces mayores que las del modelo rígido. Eliminando el primer escalón de carga, la deformación final del prototipo resulta un 81% mayor que la del modelo semirígido.



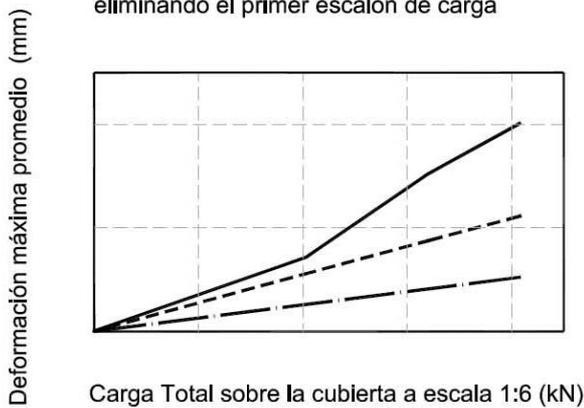
CURVAS COMPLETAS

Comportamiento del prototipo —————
 Modelo semirígido - - - - -
 Modelo rígido - · - · - ·



CURVAS AJUSTADAS

eliminando el primer escalón de carga



PENDIENTES COMPARADAS

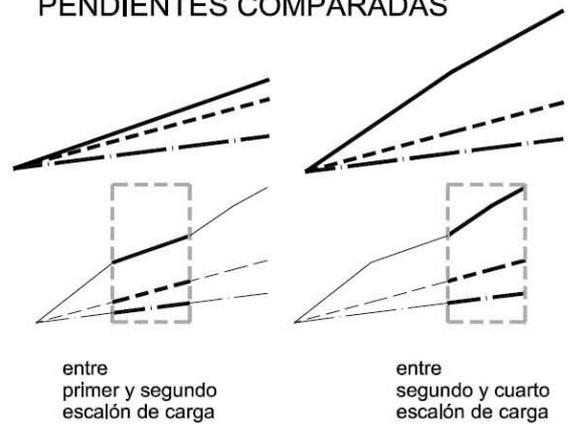


Figura 5. Curvas de deformación del prototipo en función de la carga aplicada: resultados de la prueba de carga y comportamiento de dos modelos teóricos en RFEM.

4. CONCLUSIONES

Si bien las deformaciones medidas en la prueba de carga resultaron mayores a las esperadas, consideramos que el proceso de diseño y fabricación del prototipo ha demostrado la viabilidad del sistema constructivo desarrollado, ver la figura 6. Es necesario, sin embargo, investigar el diseño y la fabricación de uniones con mayor rigidez entre las placas de la cubierta.



Consideramos que el desarrollo de una metodología CAD-CAE-CAM propia para la construcción de estructuras laminares a través de un trabajo colaborativo entre el Instituto de Tecnologías y el Centro de Integración Digital de la FADU, permitirá a nuestra Universidad ofrecer un nuevo servicio de modelado y fabricación, así como promover el uso de productos nacionales derivados de la madera en la industria local.

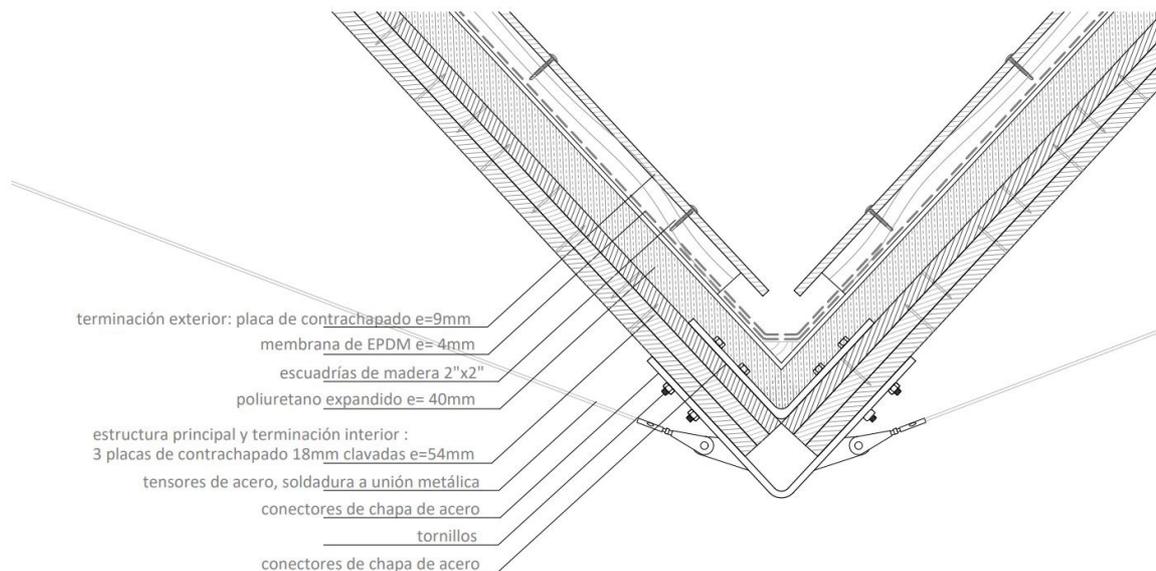


Figura 6. Detalle constructivo de la cubierta.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Udelar, Uruguay, por la financiación del proyecto de investigación “Cubiertas laminares con productos derivados de la madera, modeladas y fabricadas con procesos asistidos por computadora. Su aplicación en edificios educativos” a través del llamado a Proyectos I+D 2018.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación Española de Normalización (2006). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades mecánicas de los tableros derivados de la madera. UNE-EN 789:2006. Madrid.
- Asociación Española de Normalización (2016a). Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos. UNE-EN 14358:2016. Madrid.
- Asociación Española de Normalización (2016b). Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1995-1-1:2016. Madrid.