

DISEÑO PARAMÉTRICO *y fabricación digital* DE ESTRUCTURAS PLEGADAS *CON FORMAS COMPLEJAS* EN URUGUAY

Parametric design and digital manufacturing of folded structures with complex shapes in Uruguay

JUAN JOSÉ FONTANA-CABEZAS*, PAULO PEREYRA-BONIFACIO**
MARINA PIÑEYRO-RODRÍGUEZ***, CLAUDIA CHOCCA-BOSIO****

Fecha de recibido:
27 Noviembre 2023
Fecha de aceptado:
12 Junio 2024

*Universidad de la
República, Uruguay
juanjosefontana@fadu.
edu.uy

**Universidad de la
República, Uruguay
paulopereyra@fadu.
edu.uy

***Universidad de la
República, Uruguay
mmannng@gmail.com

****Universidad de la
República, Uruguay
cchocca@farq.edu.uy

RESUMEN. A efectos de definir un procedimiento de modelado paramétrico y fabricación asistida por computadora de estructuras laminares y formas complejas, con un router de dos ejes, se desarrolló un proyecto ejecutivo y una serie de prototipos de la cubierta de 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 a través de un proceso de *form searching* aplicando factores de optimización que atienden a la materialización, a las solicitaciones físicas, a la coordinación con los distintos aspectos constructivos y a los procesos de fabricación. Se elaboraron prototipos del sistema de la cubierta y se realizaron ensayos de las propiedades mecánicas de los tableros utilizados en el proyecto, así como una prueba de carga de uno de los prototipos. Finalmente, se analizó el desempeño estructural de la cubierta a través de correlaciones entre dos modelos de cálculo teórico y el resultado de la prueba de carga. De este modo, se ha demostrado la viabilidad de diseñar y fabricar formas estructurales complejas con tecnología de corte computarizada con dos ejes y tableros derivados de la madera de fabricación nacional.

Palabras clave: *form finding*, método CAD-CAE-CAM, router CNC de dos ejes, origami, prototipo.

ABSTRACT. In order to define a procedure for parametric modeling and computer-aided manufacturing of laminar structures with complex shapes, with a two-axis router, an executive project and a series of prototypes for the roof of an educational building were developed. For this, *form finding* experiments were carried out with the objective of finding appropriate forms for the construction of laminar structures, which were adjusted through a *form searching* process applying optimization factors that attend to the materialization, to the physical demands, to coordination with the different construction aspects and manufacturing processes. Prototypes of the roof system were manufactured and tests were carried out on the mechanical properties of the boards used in the project, as well as a load test of one of the prototypes. Finally, the structural performance of the roof was analyzed through correlations between two theoretical calculation models and the load test result. In this way, the feasibility of designing and manufacturing complex structural shapes with computerized cutting technology with two axes and boards derived from domestically manufactured wood has been demonstrated.

Key words: *form finding*, CAD-CAE-CAM method, two-axis CNC router, origami, prototype.

E

n las últimas décadas han aparecido en el mundo una gran cantidad de estructuras plegadas 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 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, los brazos robóticos pluriarticulados y los programas informáticos de modelado y cálculo estructural, son cada vez más potentes, y a costos que resultan rápidamente amortizables brindan prestaciones impensables unas pocas décadas atrás.

Es previsible, a su vez, que el costo de estas maquinarias disminuya en el corto y mediano plazo, por lo que resultará cada vez más atractivo para organismos públicos y empresas constructoras disponer de tecnología que permita la fabricación de componentes con formas complejas en plazos muy reducidos y sin la participación de mano de obra especializada.

El diseño paramétrico

El diseño paramétrico y la fabricación digital consiste en un nuevo paradigma que ha modificado el modo de proyectar y construir edificios. En arquitectura, el diseño digital comenzó siendo paramétrico. Luego, el diseño asistido por computadora (CAD) tuvo un fuerte impulso como práctica que emulaba las técnicas analógicas de representación. Oxman (2014) plantea la existencia de un primer momento

en la historia de los medios digitales de dibujo en el que el software sustituye a dichas técnicas sin aportar un procedimiento novedoso. La automatización de ciertas tareas facilita la elaboración de gráficos más precisos, pero se continúa trabajando dentro del paradigma de la representación. Más tarde, a principios del siglo XXI, emerge nuevamente la parametrización. Es posible distinguir, en la performatividad de los procedimientos paramétricos, una yuxtaposición de dominios de lo analógico, de lo informatizado y de lo computacional. Pero la condición paramétrica en arquitectura no es exclusivamente digital o computacional. Si partimos de la conceptualización desarrollada por Ramos (2019), quien define al parámetro como un dato variable, cuyo valor puede ser modificado de modo que la alteración de unos valores repercute en los otros y en el resultado último (desplegándose una colección de relaciones que permiten explorar diferentes finales) y la aplicamos al campo de la arquitectura, podemos visibilizar la acción paramétrica en lugares y momentos históricos muy disímiles. Los experimentos de *form finding* de Frei Otto *et al.*, (2006) son un ejemplo de diseño paramétrico basado en el cálculo analógico.

Wortmann *et al.* (2017) reflexionan que, si bien el diseño paramétrico digital lleva más de dos décadas aplicándose en la práctica arquitectónica, aún sigue evolucionando a medida que los programas informáticos y los conocimientos técnicos se hacen más accesibles. El proceso de diseño arquitectónico es, en la actualidad, casi siempre iterativo; los diseñadores crean soluciones que, a su vez, plantean nuevas preguntas que luego se investigan para generar soluciones más refinadas o incluso totalmente nuevas (Jabi, 2013). La representación paramétrica de un proyecto es una tarea en constante evolución, ya que la mayoría de los problemas

complejos de diseño reaccionan a la adición y supresión de entradas en múltiples escalas y niveles de complejidad. Según Park *et al.* (2010), la creación de un modelo paramétrico requiere la definición de los principales parámetros en la etapa inicial, pero este conjunto preliminar cambia a medida que el proyecto se desarrolla en sus diferentes etapas.

Davis (2013) concluye que un modelo paramétrico es siempre único. No porque tenga parámetros, ya que todo diseño, por definición, tiene parámetros. Tampoco porque cambie, dado que otras representaciones de un diseño también cambian. Su singularidad se debe al modo en que fue creado. Un modelo paramétrico es siempre creado por un diseñador, según Davis, que declara explícitamente cómo se derivan los resultados a partir de un conjunto de parámetros.

Las nuevas estructuras plegadas en madera

Según Buri (2010), el desarrollo de las estructuras plegadas ha estado siempre ligado al desarrollo de nuevos materiales para la construcción: primeramente, al hormigón armado, luego a los materiales reforzados con fibras y, en la actualidad, a los materiales derivados de la madera.

El Bamboo Forests and Huts construido en 2009 por Ryuchi Ashizawa en Osaka, el nuevo edificio para el Centro comunitario de Mount Pleasant, construido en 2016 por Chris Moller en Nueva Zelanda y el Museo de las ruinas de Miyahata, construido por Furuichi y Asociados en 2015, son ejemplos de una nueva arquitectura plegada en madera de gran ligereza y rigidez, diseñada y fabricada con la asistencia de herramientas digitales. Se trata de proyectos modelados completamente en un entorno virtual, cuyos componentes se fabrican directamente a partir de la información digital, utilizando herramientas robóticas.

En distintos ámbitos universitarios, tales como el Instituto para el Diseño computacional y la construcción (ICD) y el Instituto de Diseño estructural (ITKE) de la Universidad de Stuttgart en Alemania, el Instituto Federal Suizo de Tecnología (ETH) de Zurich, el Hooke Park de la Architectural Association de Londres o el

Laboratorio para la Construcción con madera (IBOIS) de la Universidad Politécnica Federal de Lausana en Suiza, han surgido innovadoras investigaciones basadas en el diseño y la construcción de estructuras con materiales derivados de la madera, que exploran el potencial de las herramientas de diseño y fabricación digital (Menges *et al.*, 2016).

La Capilla Saint Loup (Weinand, 2017) fue la primera materialización de las investigaciones realizadas por el IBOIS sobre estructuras plegadas de madera. Se trata de una nave simple, con una transición progresiva de lo horizontal a lo vertical. En el exterior, el primer pliegue define el acceso y hacia el fondo, los pliegues se cierran y ascienden. La geometría de la capilla logra definir, simultáneamente, espacio, cerramiento y estructura. Además, la irregularidad de los pliegues mejora la acústica y la iluminación.

El pabellón del Teatro de Vidy es otro proyecto paradigmático desarrollado por el IBOIS y asistido por Atelier Cube en Lausana, Suiza, en 2017 (Weinand, 2017; Robeller *et al.*, 2017). Esta construcción materializa un tipo innovador de estructura portante, realizada exclusivamente con paneles de madera contralaminada con una doble lámina estructural. Se diseña a partir de dos plegados: uno anti-prismático y asimétrico tipo Yoshimura en el techo, que cubre una luz de hasta 20 m, y otro prismático de una altura de 9 m, tipo acordeón, en los muros. Todas las placas se unen mediante innovadoras conexiones de tipo madera-madera que, por primera vez, fueron utilizadas a escala edilicia.

Para la fabricación de las piezas de estos proyectos se utilizaron, en todos los casos, brazos robóticos pluriarticulados de 5 ejes.

A pesar del indudable potencial plástico de este tipo de estructuras y del desarrollo que recientemente han tenido en el mundo, no existen aún en Uruguay aplicaciones relevantes en la industria de la construcción. Se considera imprescindible, por lo tanto, investigar el desarrollo de metodologías de diseño de estructuras con morfologías complejas adaptadas a nuestro medio, a nuestras necesidades edilicias, a los materiales nacionales, a nuestra disponibilidad tecnológica y a los costos locales de construcción.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

A partir de experimentos de *form finding* analógicos con técnicas de origami y de *form searching* con los programas informáticos Rhinoceros 3D (Mc Neel, 2020), Grasshopper (Rutten, 2021) y RFEM (Dlubal Software, 2020), se encontraron formas idóneas para la construcción de cubiertas laminares que fueron posteriormente optimizadas atendiendo a criterios constructivos, estructurales y productivos.

A partir de una de las formas encontradas y optimizadas se desarrolló el proyecto de un Aula para la primera infancia con una estructura de tableros contrachapados, por ser entonces el único tipo de tablero derivado de la madera de fabricación nacional. Se determinó el comportamiento térmico del sistema constructivo a partir de resultados obtenidos en ensayos de propiedades físicas de dichos tableros: ensayos de permeabilidad al vapor de agua y de conductividad térmica, siguiendo los procedimientos recomendados por la Asociación Española de Normalización (2002) y el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2016). Se utilizaron un equipo de placa caliente y muestra única, y un equipo para ensayos de copa. Para las modelizaciones estructurales se utilizaron las propiedades mecánicas del material obtenidas a través de ensayos de flexión en el plano, flexión de canto, compresión y tracción, siguiendo procedimientos recomendados por la Asociación Española de Normalización (2006 y 2016a). Se utilizó, para ello, una máquina de ensayo universal y un dinamómetro. El contenido de humedad de las probetas fue controlado con un xilohigrómetro de agujas.

Se definió un método de fabricación asistido por computadora utilizando la tecnología disponible en el Laboratorio de Fabricación Digital de la FADU. Se crearon rutinas de control numérico utilizando software CAM, de modo de generar archivos de mecanizado para la fabricación digital de los modelos de estudio. Aplicando este método, se fabricaron prototipos exploratorios del sistema estructural del proyecto desarrollado, en el Centro de Integración Digital. Se utilizaron, en este proceso, los programas Rhinoceros 3D y Cambam (Guilfanov, 2020), seis impresoras 3D con tecnología de deposición

de filamento fundido, dos cortadores láser y un router CNC de dos ejes.

Finalmente, uno de los modelos fue sometido a una prueba de carga y los resultados obtenidos fueron comparados con el comportamiento teórico de dos modelos de cálculo desarrollados en RFEM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado de la cubierta

Para la generación de la geometría de la cubierta del Aula para la primera infancia se realizaron experimentos de *form finding* con papel, primeramente, aplicando una sucesión de pliegues en V (figura 1). Las formas plegadas fueron simuladas, a continuación, con el programa Rhinoceros 3D, que cuenta con el complemento Grasshopper, dando inicio a un proceso de *form searching*. Se introdujeron, en ese momento, condicionantes dimensionales tales como las cotas de apoyo y se exportó la geometría a RFEM para analizar su comportamiento estructural. Este procedimiento permitió realizar exploraciones iterativas de modo de ajustar la forma y su patrón de plegado, a la vez que incorporar elementos auxiliares. También se realizaron experimentaciones con los complementos Kangaroo (Piker, 2021) y Crane (Suto y Tanimichi, 2019).

La correcta evacuación del agua de lluvia de la cubierta es primordial, por lo que la pendiente de los faldones y la altura total fueron controladas manipulando la geometría de los módulos y los ángulos de los pliegues.

Como dato de entrada para las simulaciones, durante todo el proceso, se utilizó el patrón del plegado, distinguiendo entre el contorno, los valles y las montañas. Se generó una malla a partir de las diferentes teselas del patrón y se indicaron anclajes al plano XY en el sector apoyado sobre una línea de pilares y, en el otro extremo, sobre una superficie ubicada a 2,10 m sobre el suelo. Se evaluó la forma obtenida y se efectuaron ajustes para modificar el patrón de plegado y llevar a cabo nuevas simulaciones.

En la figura 2 se ilustra una de las etapas del proceso de *form searching*, que condujo

al patrón final de la cubierta. Las formas que se obtuvieron en este proceso iterativo fueron exportadas a RFEM, en donde se cuantificaron sus deformaciones y se determinó el espesor

mínimo necesario de tablero contrachapado. Se incorporaron, además, tensores en forma de cruz de San Andrés para mejorar el desempeño estructural.

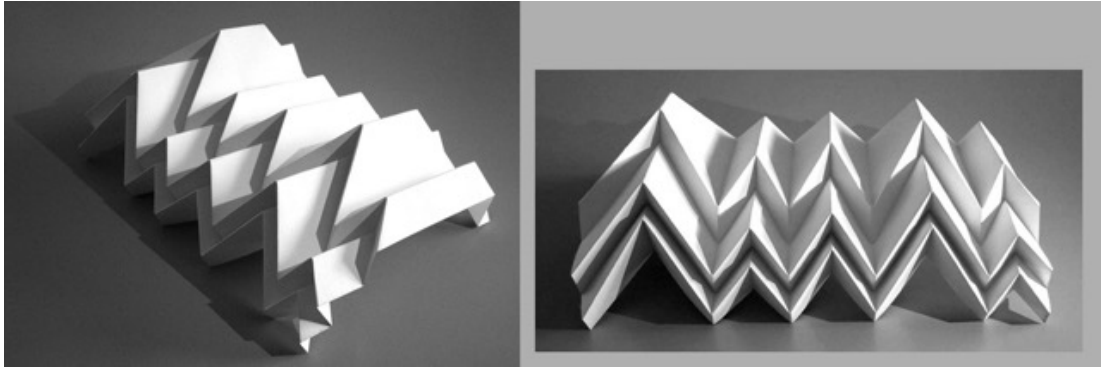


FIGURA 1. EXPERIMENTO DE *FORM FINDING* QUE DIO INICIO AL DISEÑO DE LA CUBIERTA. A) VISTA OBLICUA DE LA FORMA CON PLEGUES EN V. B) VISTA FRONTAL DEL PLEGADO.

FUENTE: FOTOGRAFÍA DE LOS AUTORES.

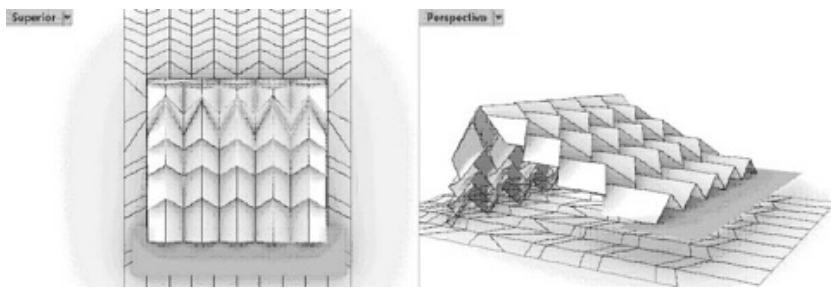


FIGURA 2. VISTAS DE UNA DE LAS ITERACIONES EN EL PROCESO DE DEFINICIÓN DE LA FORMA PLEGADA DE LA CUBIERTA, UTILIZANDO RHINOCEROS 3D. A) VISTA SUPERIOR. B) PERSPECTIVA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la búsqueda de optimización del uso de los tableros contrachapados nacionales de 2,40 x 1,20 m, se limitaron las dimensiones de las piezas de la cubierta a 2,30 x 1,10 m previendo un margen de posicionado en la cama de corte. El espesor teórico calculado para la estructura fue de 54 mm, con tableros contrachapados clasificados como F20/15 E30/25, según la normalización europea. Para el estudio del comportamiento térmico y del riesgo de condensaciones se utilizó la aplicación HTerm (Universidad de la República, 2017). Este estudio permitió definir los espesores de los materiales aislantes y constatar la viabilidad de la solución constructiva desde el punto de vista higrotérmico. La transmitancia térmica total de la cubierta resultó de 0,53 W/m²·K.

Los cálculos con RFEM 5 se realizaron utilizando el Eurocódigo 5 (Asociación Española de Normalización, 2016b). Se consideró, además del

peso propio de la estructura, una carga muerta de 0,10 KN/m² y una sobrecarga de 0,30 KN/m² sobre el faldón de menor pendiente y de 0,10 KN/m² sobre el de mayor pendiente, de acuerdo a criterios de la norma uruguaya de viento (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1994). En la figura 3 se ilustran algunos gráficos de las tensiones resultantes en la forma final.

Los tensores incorporados en el diseño permitieron reducir en un 5% la deformación máxima y en un 60% la deformación en la zona de acceso. Se dimensionaron con secciones circulares de acero S235, de 10 mm de diámetro. En la figura 4 se ilustran detalles del sistema constructivo y en la figura 5 la planimetría básica. Una vez obtenida la forma ajustada de la estructura, se procedió a su parametrización.

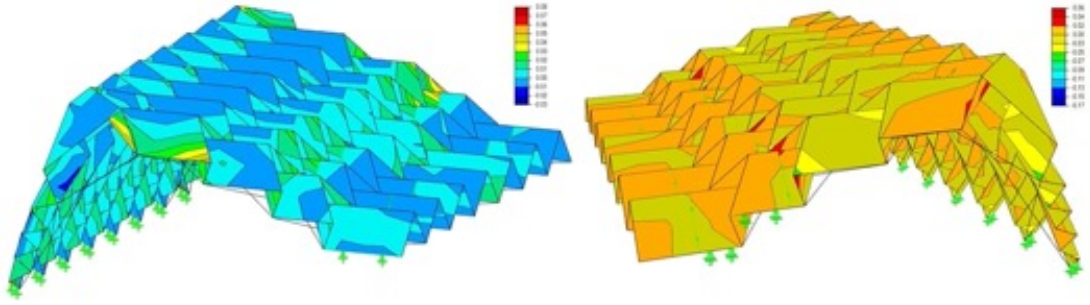


FIGURA 3. TENSIONES PRINCIPALES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO PARA COMBINACIONES PERMANENTES Y TRANSITORIAS. A) TENSIONES S₁; B) TENSIONES S₂.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

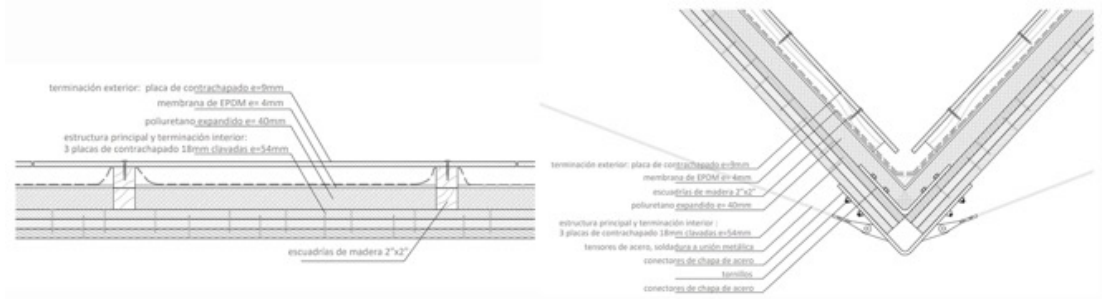


FIGURA 4. DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LA CUBIERTA PLEGADA. A) SECCIÓN DE UN FALDÓN. B) SECCIÓN DE UNA LIMAHOYA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

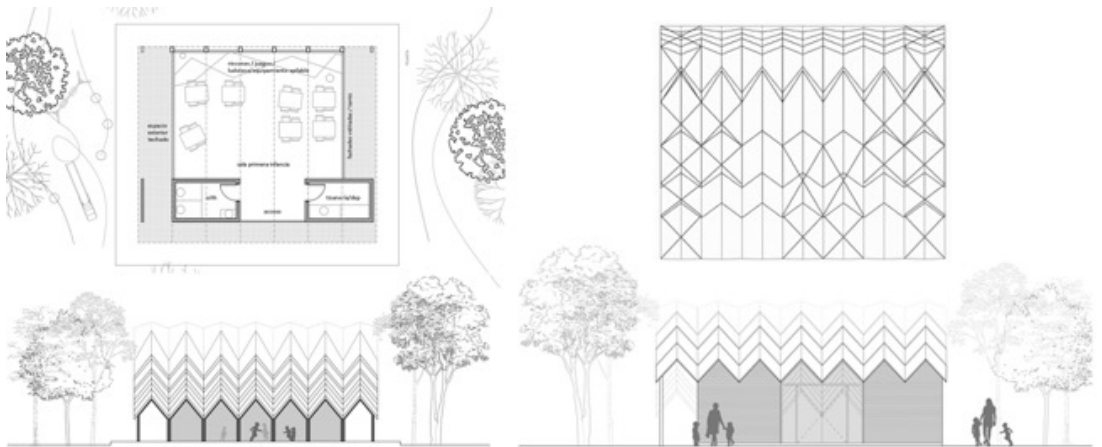


FIGURA 5. PLANIMETRÍA DEL AULA PARA LA PRIMERA INFANCIA. A) PLANTA BAJA. B) PLANTA DE CUBIERTA. C) FACHADA POSTERIOR. D) FACHADA FRONTAL.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Parametrización del modelo y fabricación digital

Se definieron como variables geométricas independientes de la parametrización las dimensiones y espesores de los faldones, así como sus separaciones. Las dimensiones de los conectores, el diámetro de los tornillos de fijación, sus separaciones y sus distancias a los bordes (tanto de los faldones como de los conectores) se incorporaron como variables dependientes del espesor de los tableros. Se

siguieron, en este proceso, las recomendaciones del Eurocódigo 5.

Se fabricó, primero, un modelo a escala 1/10 del sistema estructural con faldones de MDF de 5,5 mm de espesor nominal y conectores impresos con filamento termoplástico de ácido poliláctico de 2,75 mm de espesor. Este modelo ayudó a anticipar problemas específicos que pudieran surgir en la preparación, mecanización y armado del prototipo a 1/6, tales como las holguras necesarias para el montaje, 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 (figura 6a).

Finalmente, se fabricó y montó un modelo a escala 1/6 con placas de tablero 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 (figura 6b). Se utilizaron 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 de dos ejes con fresa para el corte de los tableros contrachapados.

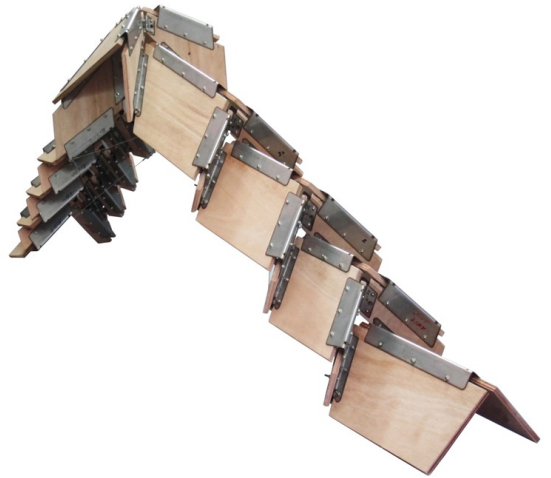


FIGURA 6. MODELOS A ESCALA DEL SISTEMA DE LA CUBIERTA DEL AULA PROYECTADA. A) MODELO A ESCALA 1/10. B) MODELO A ESCALA 1/6.

FUENTE: FOTOGRAFÍA DE LOS AUTORES.

El mecanizado de las piezas involucró un conjunto de operaciones. En primer lugar, la generación de una base gráfica de datos, diagramada en un formato coincidente con las dimensiones del hardware de operación y organizado en capas. A continuación, fue necesario verificar la planeidad de las figuras generadas y controlar las entidades organizadas en capas y unidades de referencia. Estos controles permitieron obtener la geometría plana de cada faldón en un formato de intercambio binario, para exportar a un sistema CAM. Esta exportación requirió de la sistematización de la información geométrica procesada, articulada en un sistema de unidades, planos de referencia y organización por capas. Finalmente, se definió el proceso de mecanizado.

Las etapas del procedimiento paramétrico desarrollado incluyeron la incorporación de las variables independientes de la geometría mediante la definición de vínculos entre las entidades persistentes (aquellas que fueron desarrolladas en Rhinoceros 3D) y las volátiles (aquellas desarrolladas en Grasshopper), la

indexación y diferenciación de dichas variables, la incorporación de sus atributos, la activación de un algoritmo genético destinado a optimizar la distancia entre faldones, la explicitación e incorporación de restricciones, la definición de la taxonomía de los vínculos y de su materialidad, el despliegue de los faldones sobre los tableros, la definición de su materialidad y la incorporación de orificios. La información de salida en formato dxf se exportó a un software del tipo CAM que tradujo la información geométrica al código G, encargado de controlar los dispositivos electromecánicos de la tecnología CNC empleada.

Para definir los conectores, se siguió un fragmento de programación similar al empleado en los faldones. La principal diferencia fue que la materialidad obtenida fue procesada, posteriormente, en un taller tercerizado de servicios que plegó las piezas cortadas, estampadas y numeradas. Fue necesario prever, por otra parte, una holgura que posibilitara absorber diferencias dimensionales en los encuentros entre los faldones, los conectores y los tornillos.

Prueba de carga de un prototipo del sistema estructural

En la figura 7a se ilustra la prueba de carga realizada al modelo a escala 1/6 y en la figura 7b, las deformaciones teóricas de uno de los modelos del prototipo en RFEM.

Las deformaciones medidas durante la prueba 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- (figura 8a). No fue posible analizar un modelo teórico con uniones exclusivamente articuladas, ya que resultaba inestable.

En el primer escalón de carga la deformación del prototipo resultó casi el triple que la del modelo semirígido. 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 (figura 8b). 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 (figura 9).

Si bien las deformaciones medidas en la prueba de carga resultaron mayores a las esperadas, se considera que el proceso de diseño y fabricación del prototipo ha demostrado la viabilidad del sistema estructural desarrollado. Es necesario, sin embargo, investigar el diseño y la fabricación de uniones alternativas entre las placas de la cubierta.

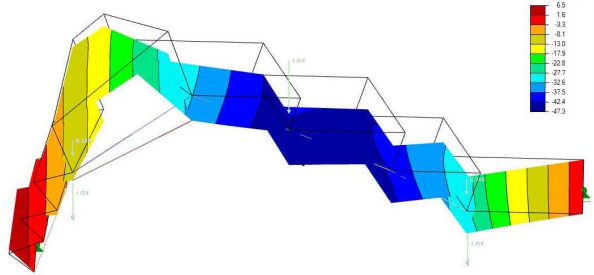
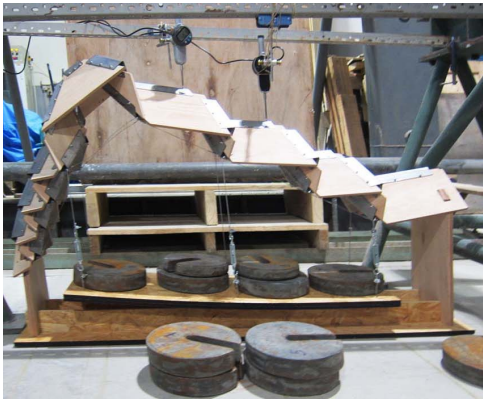


FIGURA 7. A) PRUEBA DE CARGA DEL PROTOTIPO A ESCALA 1/6. B) DEFORMACIONES EN EL EJE Z (MM) DE UN MODELO TEÓRICO DEL PROTOTIPO EN RFEM.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

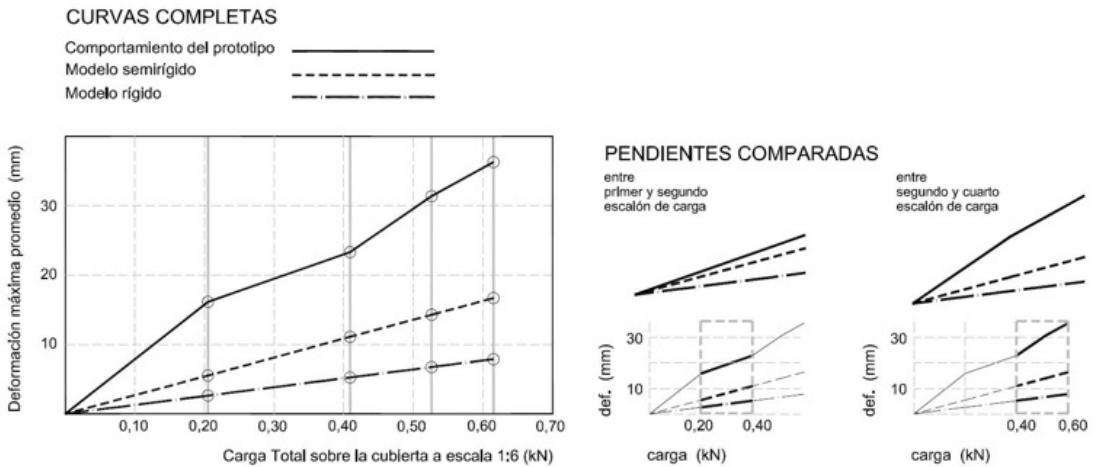


FIGURA 8. CURVAS DE DEFORMACIÓN DEL PROTOTIPO EN FUNCIÓN DE LA CARGA APLICADA: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA Y COMPORTAMIENTO DE DOS MODELOS TEÓRICOS EN RFEM. A) CURVAS COMPLETAS. B) COMPARACIÓN DE LAS PENDIENTES DE ALGUNOS TRAMOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

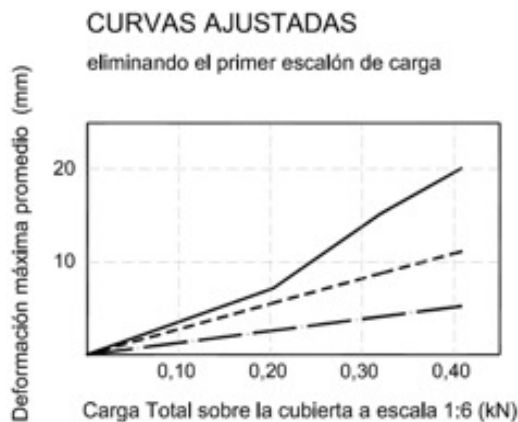


FIGURA 9. CURVAS AJUSTADAS DE DEFORMACIÓN DEL PROTOTIPO EN FUNCIÓN DE LA CARGA APLICADA, ELIMINANDO EL PRIMER ESCALÓN DE CARGA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CONCLUSIONES

Los prototipos demuestran que es viable fabricar, con un router de 2 ejes, estructuras laminares plegadas de alta complejidad formal con tableros nacionales derivados de la madera. Estas estructuras podrían emular la complejidad arquitectónica de aquellas diseñadas y fabricadas en otros ámbitos, con disponibilidad de brazos de corte pluriarticulados, pero utilizando tecnología sustractiva de tan sólo dos ejes.

Es necesario investigar soluciones alternativas para el diseño de las uniones entre los faldones con piezas metálicas. Si bien las deformaciones medidas en la prueba de carga de uno de los modelos fabricados resultaron mayores a las esperadas, consideramos que el proceso de diseño y fabricación del prototipo ha demostrado la viabilidad del sistema estructural. La continua evolución de los programas informáticos y de las maquinarias de corte y manipulación de objetos obligará a una continua revisión, actualización y ajuste de estas metodologías.

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”.

**ES NECESARIO
INVESTIGAR
SOLUCIONES ALTERNATIVAS
PARA
EL DISEÑO
DE LAS UNIONES
entre los faldones con
PIEZAS
METÁLICAS.**

FUENTES DE CONSULTA

Asociación Española de Normalización (2002), UNE-EN 12664:2002: Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica. AENOR, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (2006), UNE-EN 789:2006: Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades mecánicas de los tableros derivados de la madera. AENOR, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (2016a), UNE-EN 14358:2016: Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos. AENOR, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (2016b), UNE-EN 1995-1-1:2016: Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. AENOR, Madrid, España.

Buri, H. (2010), *Origami - Folded plate structures*. Tesis doctoral, EPFL, Lausana, Suiza. Director: Yves Weinand.

Davis, D. (2013), *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. Tesis doctoral, RMIT University, Melbourne.

Dlupal Software (2020), RFEM (5.23.02). Windows. Alemania: Dlupal GmbH.

Guilfanov, I. (2020), *CamBam plus (1.0)*. Windows. Hex Ray Ltda.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1994), UNIT 50:84 Segunda revisión: Acción del viento sobre construcciones. UNIT. Montevideo, Uruguay. Disponible en <http://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/697>, consultado el 14 de noviembre de 2023.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2016), UNIT-ISO 12572:2016: Desempeño higrotérmico de los materiales y productos de construcción - Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua - Método de la copa. Montevideo, Uruguay.

Jabi, W. (2013), *Parametric design for architecture*, Laurence K. Publishing, Londres.

Mc Neel, R. (2020), *Rhinoceros 3D (6)*. Windows. Miami: Robert McNeel & Associates.

Menges, A., Schwinn, T. y Krieg, O. (2016), *Advancing wood architecture. A computational approach*, Routledge, Nueva York.

Otto, F. y Rasch, B. (2006), *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, Axel Menges, Munich.

Oxman, R. y Oxman, R. (2014), *Theories of the Digital in Architecture*, Editorial Routledge, UK.

Park, K. y Holt, N. (2010), "Parametric design process of a complex building In practice using programmed code as master model", *International Journal of architectural computing*, issue 03, vol. 08, pp. 359-376.

Piker, D. (2021), *Kangaroo (2). Windows*. Daniel Piker, Londres.

Ramos, A. (2019), "Una mirada analógica a lo digital en los inicios de lo paramétrico en arquitectura", *Veredes, Arquitectura y Divulgación*, 01, pp. 44-52.

Robeller, C., Gamarro, J. y Weinand, Y. (2017), "Théâtre Vidy Lausanne. A Double-Layered Timber Folded Plate Structure", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 58, núm. 4, pp. 295-314.

Rutten, D. (2021), *Grasshopper. Windows*, Robert McNeel & Associates, Miami.

Suto, K. y Tanimichi, K. (2019), *Crane (0.2.0)*. Windows. Tokio: Nature Architects Inc.

Universidad de la República (2017), *HTerm (3.0)*. Windows. Montevideo: Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería y Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República.

Weinand, Y. (2017), *Advanced timber structures. Architectural designs and digital dimensioning*, Birkhauser, Verlag AG.

Wortmann, T. y Tuncer, B. (2017), "Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction", *Design Studies*, 52, pp. 173-197.