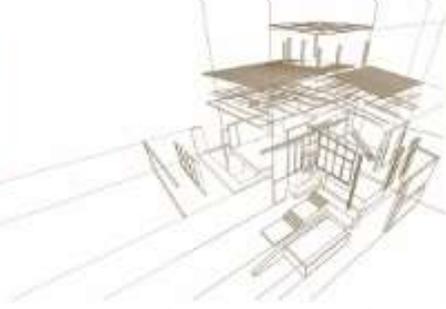


CLEM
2019 | 18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

CUBIERTAS LAMINARES CON PANELES DERIVADOS DE LA MADERA, MODELADAS Y FABRICADAS CON PROCESOS CAD-CAM

LAMINAR ROOF COVERS OF TIMBER DERIVED PANELS, DESIGNED AND MANUFACTURED BY COMPUTER ASSISTED PROCESSES

Juan J. Fontana^{(1)*}, Claudia V. Chocca⁽²⁾, Paulo A. Pereyra⁽³⁾, Susana E. Torán⁽⁴⁾, Marina Piñeyro⁽⁵⁾, Victoria Aste⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Dr. Arq. Instituto de la Construcción (IC), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU), Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay.

⁽²⁾ Mg. Arq. IC, FADU, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

⁽³⁾ Arq. Laboratorio de Fabricación Digital Montevideo, FADU, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

⁽⁴⁾ Bach. IC, FADU, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

⁽⁵⁾ Arq. IC, FADU, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

⁽⁶⁾ Arq. IC, FADU, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

* Contacto: Juan J. Fontana: juanjosefontana@fadu.edu.uy

CÓDIGO: 4603308

Resumen

Se diseña un procedimiento de modelado paramétrico y de fabricación asistido por computadora para cubiertas laminares con materiales nacionales derivados de la madera, adaptado a la tecnología y a las condicionantes de nuestro medio.

A través de una serie de experimentos de *form finding* se hallan formas idóneas para la construcción de cubiertas laminares. Se confeccionan modelos analógicos que permiten simular las propiedades de distintas morfologías laminares, con el objetivo de explorar compositivamente formas resistentes y comprender su funcionamiento estructural. Se elabora un catálogo. A una selección de las formas analizadas se le aplican factores de optimización atendiendo a las propiedades de los materiales con que van a ser construidas, a las solicitaciones físicas, a la coordinación con aspectos constructivos (evacuación de pluviales, aislación térmica y acústica, alojamiento de instalaciones, etc.) y al proceso de fabricación. El procedimiento de modelado paramétrico y de fabricación asistido por computadora definido, será probado el próximo año a través de la fabricación de una serie de prototipos a escala y de módulos a escala real, que se someterán a ensayos de resistencia mecánica.

Palabras-clave: form finding, origami, formas complejas, optimización.

Abstract

A parametric modeling and computer aided manufacturing procedure is designed for laminar cover structures, fabricated with national materials derived from timber, adapted to the technology and to the conditioning factors of our country.

Through a series of form finding experiments, morphologies for the construction of laminar covers are found. Analogic models, that allow to simulate the properties of different laminar morphologies, are made with the objective to explore resistant forms and to understand their structural functioning. A catalog is prepared. Optimization factors are applied to a selection of the analyzed forms, taking into account the properties of the materials with which they are going to be built, the physical loads, the coordination with construction aspects (rain water evacuation, thermal and acoustic insulation, accommodation of facilities, etc.) and the manufacturing process. The parametric modeling and computer-aided manufacturing procedure defined will be tested next year through the manufacture of a series of scale prototypes and full-scale modules, which will be submitted to mechanical strength tests.

Keywords: form finding, origami, complex forms, optimization.

1. Introducción

En las últimas décadas, han aparecido en el mundo una gran cantidad de estructuras de formas complejas optimizadas estructuralmente, 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-cam, ha vuelto posible el diseño y la elaboración de componentes constructivos optimizados con morfologías complejas, 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 (láser y router de corte numérico CNC, por ejemplo), 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 nuestro medio de los métodos cad-cam. 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 esta tecnología que permite la fabricación de componentes con formas complejas en plazos muy reducidos y sin la participación de mano de obra especializada. Por estos motivos, se estima factible que el mercado nacional adopte en el corto plazo este tipo de soluciones estructurales. Es indudable, por otra parte, el potencial plástico de este tipo de estructuras. 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

Se desarrolla un método de modelado y fabricación asistido por computadora, adaptado a los materiales estructurales derivados de la madera nacional y a la tecnología disponible en el Laboratorio de Fabricación Digital (labFabMVD) de FADU. Se realizan experimentos de form finding, analógicos y digitales, con el fin de encontrar una serie de formas óptimas para la construcción de cubiertas laminares fabricadas con paneles derivados de la madera. Se le aplican a dichas formas una serie de factores de optimización y se elabora un catálogo. Se explora el potencial arquitectónico de esta tipología constructiva y estructural a través de una experiencia de enseñanza en un curso de grado de la carrera de Arquitectura en FADU, UdelaR.

A través de una serie de entrevistas a jefes y técnicos responsables del diseño y la construcción edilicia en instituciones educativas públicas, se verifica la pertinencia de los resultados alcanzados en estas actividades.

A partir de algunas de las formas estructurales encontradas y optimizadas, se realizará el próximo año el proyecto ejecutivo de una serie de cubiertas para edificios educativos. Se verificará la pertinencia del método cad-cam desarrollado a través de la fabricación y el montaje, en el labFabMVD y en el LabIC de FADU, de prototipos que se someterán a ensayos de resistencia mecánica. Se construirán prototipos a escala reducida de cubiertas completas, y módulos a escala real. Se compararán los resultados obtenidos en los ensayos con las características mecánicas de las cubiertas, determinadas teóricamente.

3. Resultados

3.1. Experimentos de form finding: motivos, patrones básicos y optimización de la forma

A través de una serie de experimentos de form finding se hallan formas idóneas para la construcción de cubiertas laminares. Utilizando técnicas de origami se confeccionan modelos analógicos a escala, simulando las propiedades físicas de distintas morfologías espaciales, con distintos sistemas estructurales, con el objetivo de explorar compositivamente formas resistentes, comprender su funcionamiento estructural (Moreno y Fernández 2017; Trebbi 2015; Vyzoviti 2012) y definir mecanismos para su optimización.

Un motivo o célula básica es un dibujo lineal simple, que contiene la información necesaria para plegar un trozo de papel: valles y montañas. Un patrón básico es un modelo de plegado de una hoja de papel que surge de la repetición de un motivo, con un ritmo regular (Jackson 2013). Los patrones básicos pueden moldearse a través de la aplicación de mecanismos de manipulación, con el objetivo de explorar su potencial plástico y arquitectónico (estructural y constructivo). De este modo, surgen patrones manipulados o complejos.

Los mecanismos de manipulación consisten en alteraciones de algunas de las características geométricas del patrón de plegado, que provocan distorsiones en su ritmo. Se pueden clasificar en:

- 1- Alargamientos: se modifican las proporciones de los motivos que componen el patrón, obteniéndose variaciones en su ritmo.
- 2- Rotaciones: se modifican los ángulos o inclinaciones de los motivos que componen el patrón.
- 3- Simetrías: se repiten por reflexión los motivos o grupos de motivos que conforman el patrón.
- 4- Polarizaciones: los motivos que conforman el patrón se organizan u ordenan a través de giros alrededor de puntos fijos o polos.
- 5- Deslizamientos: los motivos que conforman el patrón se organizan u ordenan a través de traslaciones en el plano.
- 6- Combinaciones: acoplamiento de dos o más patrones básicos o manipulados.

3.2. Catálogo de formas básicas y de formas optimizadas

El resultado del estudio formal de patrones de plegado se ordena en un catálogo. Se distinguen las siguientes categorías:

- 1- Progresiones lineales: son aquellos patrones básicos cuyos motivos son progresiones de valles y montañas paralelos.

Según su ritmo, pueden clasificarse en acordeones, plisados o plegados en caja. Cuando los motivos definen una sucesión alternada de valles y montañas de igual proporción, se genera un acordeón. Este es uno de los patrones básicos más sencillos. Cuando la sucesión de valles y montañas no mantienen la misma proporción, surgen los plisados. Si los motivos definen una sucesión valle-valle-montaña-montaña, se genera un plegado en caja.

- 2- Hélices y espirales.

3- Plegados en V. (ver Figura 1)

4- Otros teselados con motivos complejos: retículas con pliegues, triángulos, cuadrados y hexágonos giratorios, flores fracturadas, montañas en V, etc.

5- Arcos y bóvedas: expansiones en cruz (patrón de Yoshimura) o romboidales, expansiones en V simples, o con esquina cuadrada, espina de pez, etc.

6- Pirámides y domos: inversiones de cajas, paraboloides, acordeones piramidales, retículas con pliegues en cruz (ver Figura 2), plegados en cruz radiales, progresiones cilíndricas (en caja, plisado o acordeón), etc.

7- Motivos modulares encastrables: motivos en base triangular, cuadrangular, etc.

8- Otras exploraciones: kirigami, caleidociclos, plegados en V volumétricos, plegados curvos, etc.

Se valora en las distintas categorías morfológicas encontradas:

A- Su rigidez geométrica (capacidad de oponerse a ser deformada o curvada) o flexibilidad (aptitud para deformarse o curvarse), cuando es manipulada según distintas direcciones fuera de los planos de sus pliegues. Es un índice de su potencial para ser utilizada como morfología estructural o resistente. Es un índice, igualmente, de su potencial para ser utilizada en el diseño de estructuras móviles.

B- Su potencial de manipulación, es decir, su capacidad para ser alterada o distorsionada a través de la aplicación de los distintos mecanismos de manipulación. Es un índice de su capacidad de adaptación para conformar geometrías optimizadas y complejas.

C- La conservación o pérdida de la planeidad de las caras durante la manipulación. Esta característica es determinante de los procedimientos y materiales con los que podrá ser fabricada y construida.

D- Su potencial sistémico. Es una valoración de su aptitud para resolver problemas asociados a la materialización de sistemas constructivos.

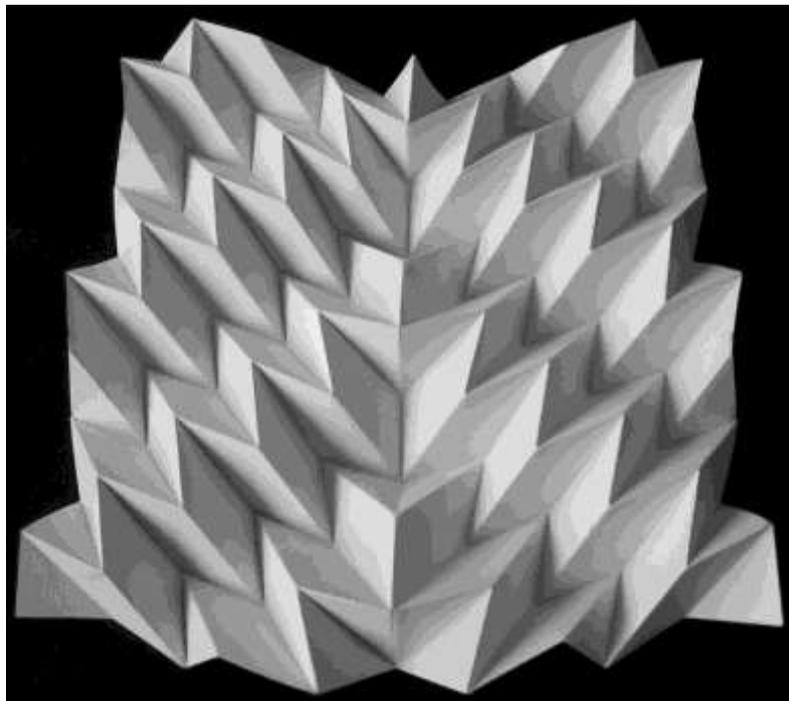


Figura 1: Plegado en V con rotaciones y desplazamientos.

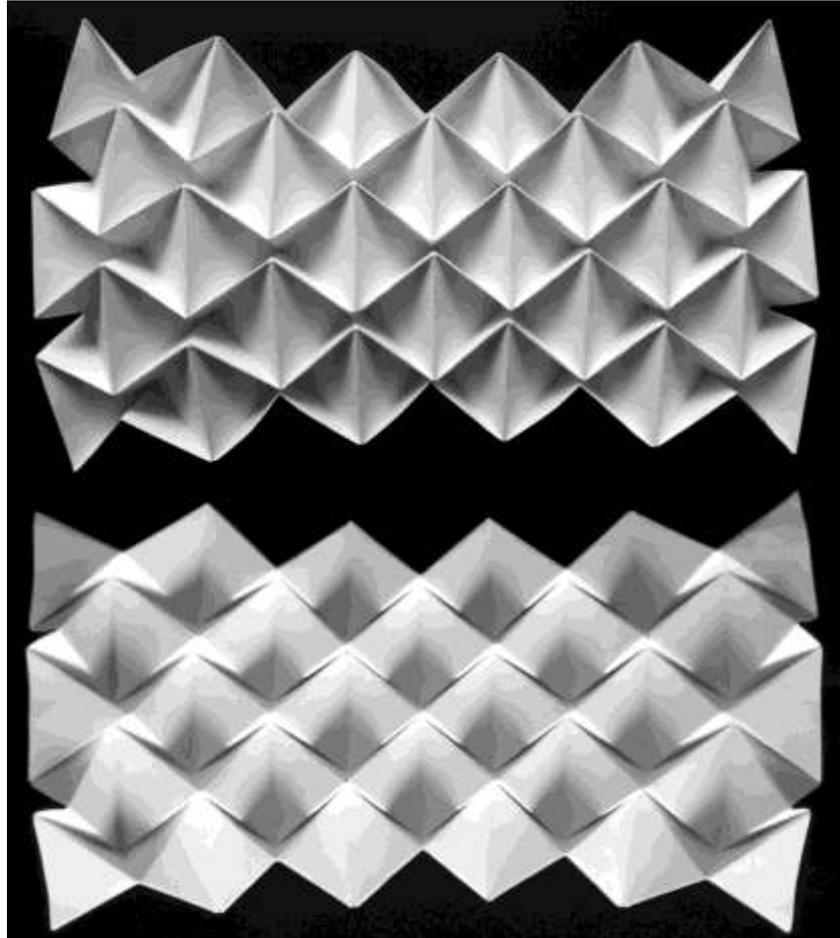


Figura 2: Retícula con pliegues en cruz, sin distorsiones.

3.3. Procedimiento de modelado paramétrico y fabricación digital asistido por computadora

La definición de un procedimiento de modelado paramétrico implica generar un algoritmo en el que estén interrelacionados todos los elementos o parámetros involucrados en la conformación morfológica de la(s) cubierta(s) laminar(es). La indeterminación numérica entre singular y/o plural obedece al hecho de que el procedimiento de modelado paramétrico posibilita diseñar un proceso mediante el cual es posible obtener “n” elementos a partir de la definición algorítmica y a partir de la cual, se “extrae” una muestra que mejor se aproxima a las condiciones planteadas como óptimas, para que una vez materializada pueda ser analizada y experimentada. En un proceso de modelado paramétrico la forma en sí misma ya no se dibuja, sino que se define un proceso a través del cual ésta es generada. La forma puede, por lo tanto, ser ajustada y modificada a través del control de los parámetros que la definen.

La definición del procedimiento implica:

1- Elección de un marco de programación algorítmico; se opta trabajar con el plug-in “Grasshopper” que es un lenguaje de programación visual muy intuitivo, de amplio uso en la actividad académica relacionada con el diseño y que se ofrece de manera gratuita.

- 2- Determinación de parámetros y componentes; conlleva definir y establecer los elementos intervinientes en el proceso así como el tipo de relación que se establece entre ellos (relaciones matemáticas, geométricas, vectoriales, lógicas) y que se llevará a cabo mediante los componentes responsables de ejecutar acciones.
- 3- Adopción de una de las posibles morfologías de plegado experimentadas a partir de la técnica de origami. Del catálogo de formas básicas y optimizadas confeccionado, fue seleccionado para ser parametrizado el acordeón (progresión lineal), debido a sus cualidades expresivas y formales, a su rigidez geométrica, y a su gran aptitud para ser manipulado y para conformar sistemas constructivos.
- 4- Definición de los elementos materiales que conformarán la cubierta y los elementos de unión o fijación entre sus distintos componentes, y entre ellos y los puntos de descarga. Se prevé trabajar con tableros de madera contrachapada nacional de 120 x 240 cm y espesores de hasta 20 milímetros. Los elementos de unión y fijación se realizarán mediante encastres del tipo machihembrados según las dos dimensiones que definen la superficie de cada tablero (Robeller y Weinand 2015; Robeller y Weinand 2016).
- 5- Selección de elementos de salida (outputs); referido a los elementos geométricos (tipo y formatos) necesarios para poder realizar la materialización de la forma, generando los insumos de información propios de un sistema cad-cam.

3.4. Encuestas

En el marco de la investigación y con el propósito de recoger la opinión de profesionales expertos en diseño de edificios educativos, se realiza una encuesta preliminar. Esta encuesta busca obtener información acerca de las ventajas y desventajas que ofrecen este tipo de cubiertas frente a otras soluciones constructivas desde diferentes puntos de vista (adecuación ambiental, salud e higiene, seguridad de los espacios contra intrusión, desempeño térmico y acústico, estética, protección contra incendios, durabilidad y mantenimiento, integridad estructural y estanqueidad, etc.) para diferentes tipos de espacios educativos (aulas, salas de conferencias, auditorios, gimnasios, piscinas, bibliotecas, etc.).

Partiendo de lo apropiado del uso de la madera desde el punto de vista medioambiental, se consulta acerca de la adecuación del uso de este material para la construcción de cubiertas de mediana y gran escala en nuestro país. Por otra parte, se consulta acerca de aspectos técnicos a tener en cuenta, tales como materiales o accesorios recomendados (materiales aislantes, elementos de soporte o sujeción, etc.), posibles interferencias con sistemas de instalaciones (iluminación, calefacción, refrigeración, ventilación, etc.) y puntos críticos a considerar.

Por último, se solicita una valoración del atractivo arquitectónico de este tipo de cubiertas, del potencial de desarrollo que tienen en nuestro país y del interés personal en implementar este tipo de soluciones.

3.5. Una experiencia de enseñanza

A efectos de explorar el potencial arquitectónico de las cubiertas plegadas de madera como solución de medianas o grandes luces en edificios educativos, durante el primer semestre de 2019 se trabaja en colaboración con un equipo de docentes del Taller Danza (FADU-UdelaR) en el dictado del curso “Proyecto de Tema Específico: Exploraciones holísticas – madera”, optativo de la carrera de Arquitectura.

Este curso se estructura a partir de dos actividades curriculares que se complementan entre sí, al mismo tiempo que aportan a la investigación:

1- El desarrollo en las estructuras existentes en el Parque Tecnológico Industrial (PTI) del Cerro de un programa que complementara las actividades educativas que hoy se desempeñan.

2- El diseño de estructuras plegadas con paneles derivados de la madera, capaces de salvar luces medianas y grandes.

Se parte de la hipótesis de incorporar al complejo educativo del PTI-Cerro un programa que indague en su espacialidad a partir de la resolución de una cubierta en madera, diseñada y fabricada con tecnología apropiada a nuestro medio. Con esta incorporación, se pretende re-estructurar los programas que hoy se desempeñan en el sitio y explorar un nuevo perfil para el centro educativo.

Se adjuntan imágenes de algunos de los trabajos realizados por los estudiantes del curso (ver Figuras 3 a 6).

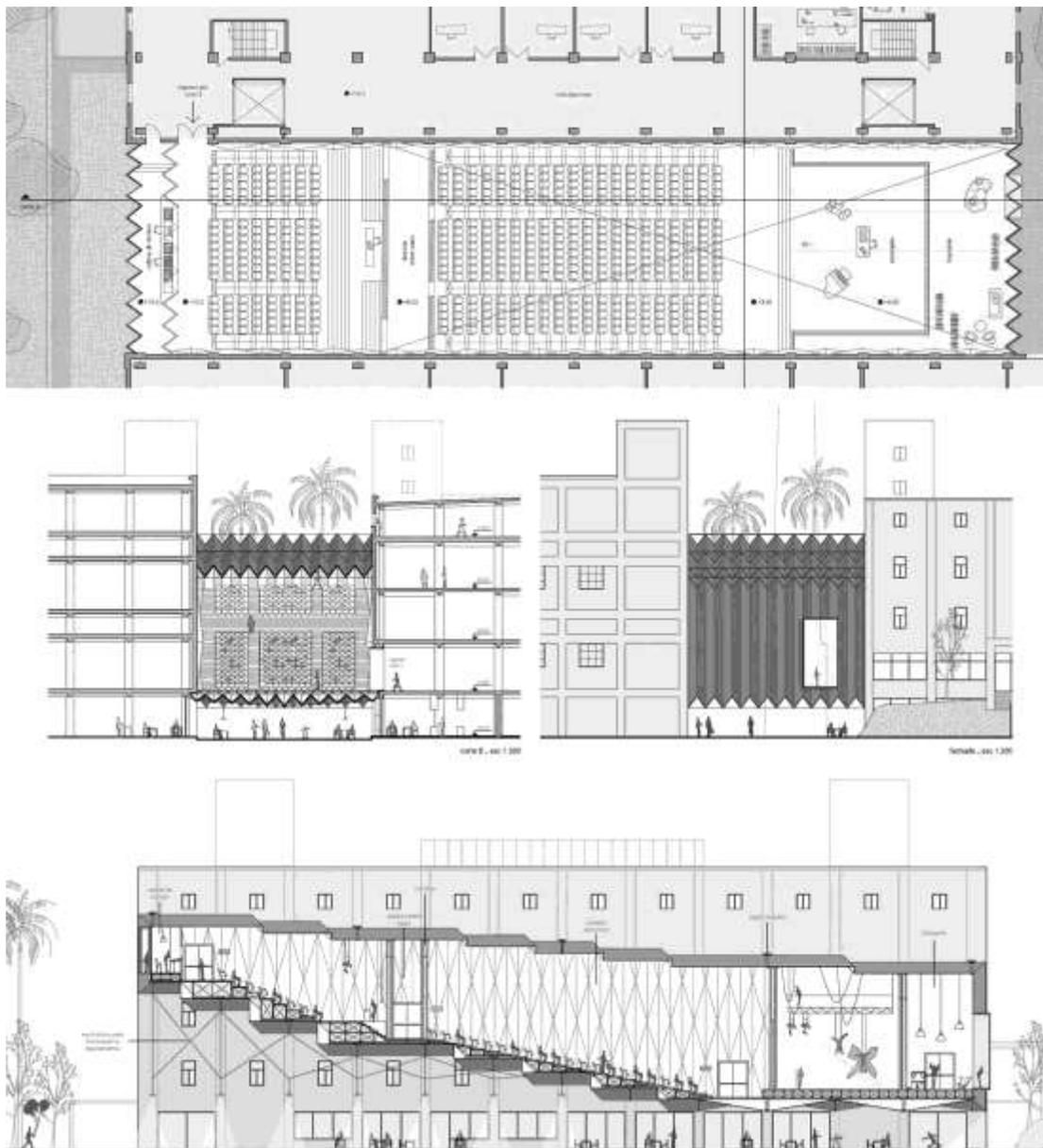


Figura 3: Auditorio PTI-Cerro. Autores: Agustín Dellepiane y Victoria De Vida.



*Figura 4: Cubierta sobre Hall de acceso, cancha, circulación vehicular y terraza-comedor.
Autores: Gonzalo Castelló y Lorena Tovagliares.*

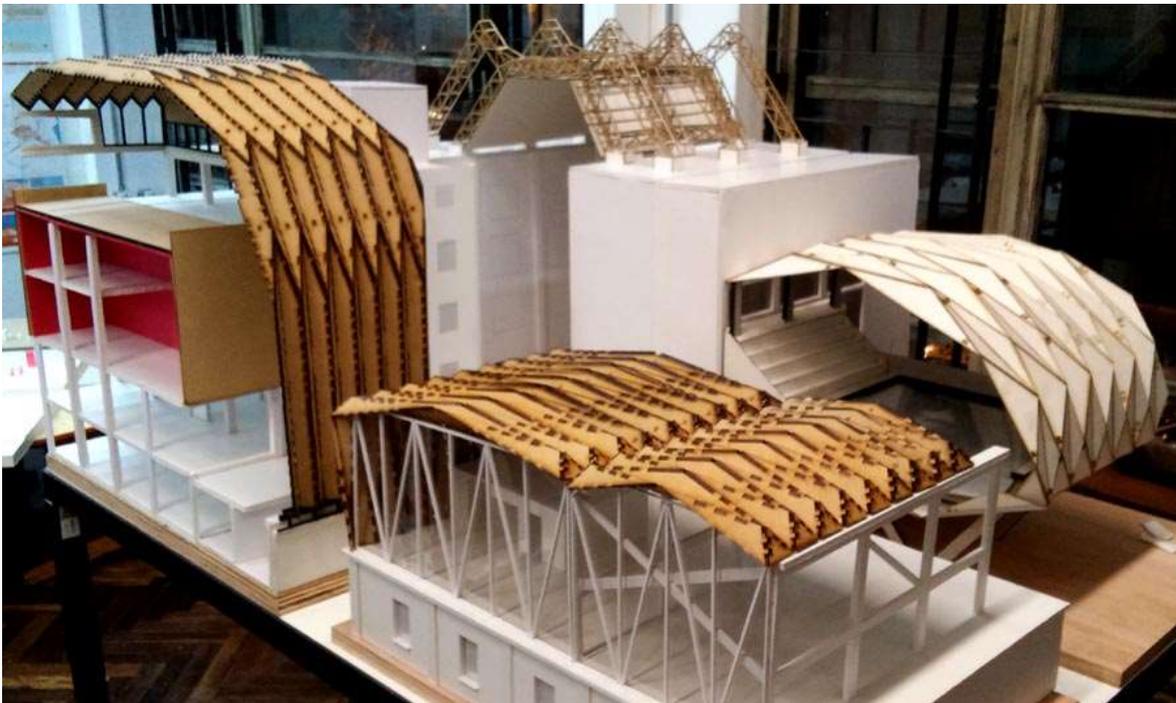


Figura 5: Algunas maquetas entregadas en el curso.

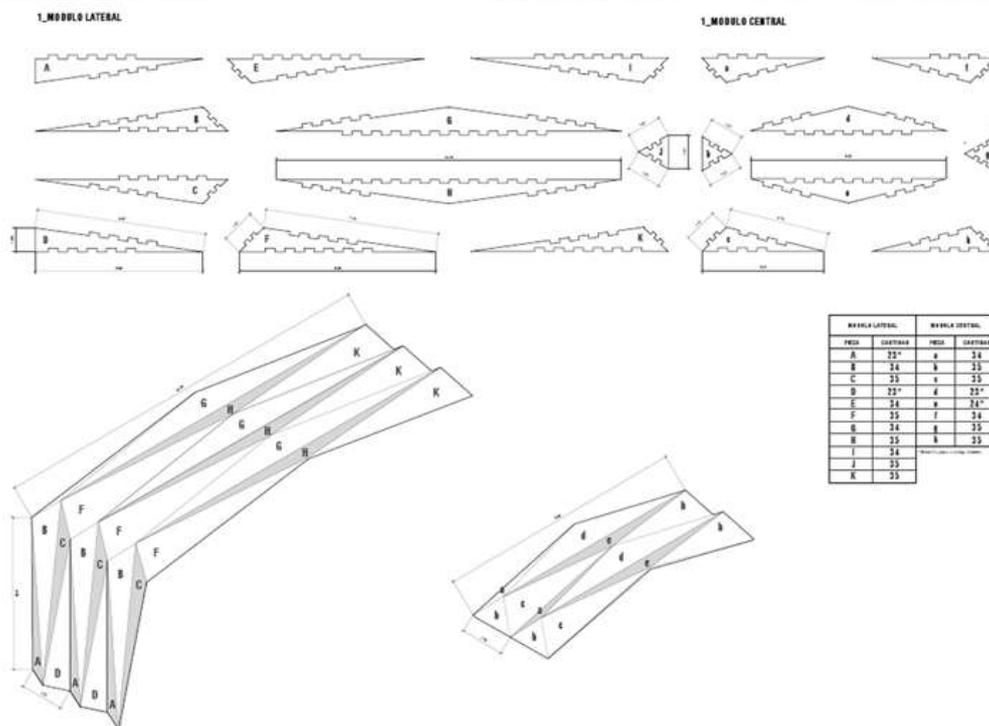


Figura 6: Centro de Investigación. Autores: Giuliana Rodríguez y Joaquín Roybal.

4. Conclusiones

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

Las entrevistas realizadas permiten verificar la pertinencia de las cubiertas laminares de madera de escala mediana y grande como solución para la construcción de edificios educativos en nuestro país.

El catálogo confeccionado con las morfologías estructurales halladas y optimizadas, permite apreciar la gama de soluciones arquitectónicas que es posible modelar y fabricar con métodos CAD-CAM, en tanto que el trabajo llevado a cabo en el curso “Proyecto de Tema Específico: Exploraciones holísticas–madera”, permite una primera visualización del potencial arquitectónico de esta solución constructiva.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la UdelaR 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. La presente ponencia presenta los avances que se han realizado hasta la fecha en dicha investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JACKSON, P. (2013). Técnicas de plegado para diseñadores y arquitectos. Promopress Ediciones, Barcelona, España.

MORENO, P. y FERNANDEZ-LLEBREZ, J. (2017). Aportaciones de los modelos físicos al desarrollo y construcción de las estructuras laminares en el s. XX. Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, San Sebastián, España, Vol. 2, págs. 1103-1112.

ROBELLER, C., y WEINAND, Y. (2015). Interlocking Folded Plate. Integral MeChanical Attachment for Structural Wood Panels. International Journal of Space Structures 30, 111–122.

ROBELLER, C. y WEINAND Y. (2016). A 3D cutting method for integral 1dof multiple-tab-and-slot joints for timber plates, using 5-axis CNC cutting technology. Actas del World Conference on Timber Engineering, Viena, Austria.

TREBBI, J.C. (2015). El arte del plegado: formas creativas en diseño y arquitectura. Promopress Ediciones, Barcelona, España..

VYZOVITI, S. (2012). Surfaces: folding as a method of generating forms for architecture, products and fashion. Bis Publishers.