

Formas plegadas optimizadas para el desarrollo de cubiertas con tableros derivados de la madera

Autores: Karen Crosa ⁽¹⁾, Juan José Fontana ⁽¹⁾, Marina Piñeyro ⁽¹⁾, Virginia Vila ⁽¹⁾

¹ Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. Bv Artigas 1031, Montevideo, CP. 11300, Uruguay.

Resumen

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de morfologías estructurales complejas basadas en la eficiencia de la forma, aprovechando el potencial que las nuevas herramientas de diseño y fabricación asistidos por computadora brindan. Particularmente, se encuentran formas de cubiertas plegadas optimizadas, que puedan ser fabricadas con tableros derivados de la madera y herrajes disponibles en el mercado local.

A partir de una serie de experimentos de *form finding* con técnicas de *origami*, se seleccionaron patrones de plegado aptos para la conformación de cubiertas de luces medianas o grandes. Manipulando los patrones, utilizando *Rhinoceros 3D*, se encontraron variaciones de las formas con distintas alturas, pero manteniendo constante la luz. Luego, el comportamiento estructural de las formas fue analizado utilizando RFEM. Dimensionando las formas con el mismo material pero distinto espesor, e igualando las deformaciones máximas, se comparó el peso propio de cada una por unidad de superficie cubierta (Kg/m^2). Finalmente, se analizaron alternativas para el incremento de la rigidez de las formas que presentaron un mejor comportamiento estructural, a través de la incorporación de bielas y tensores de acero.

La optimización de formas a partir de experimentos analógicos y digitales, es indispensable para el posterior diseño paramétrico y fabricación asistida por computadora de prototipos.

Palabras clave: origami, morfologías estructurales, modelos informáticos, diseño paramétrico.

Abstract

The aim of this work is the development of complex structural morphologies based on shape efficiency, taking advantage of the potential that new computer-aided design and manufacturing tools provide. Particularly, there are optimized forms of folded roofs, which can be manufactured with wood derived boards and steel connectors available on the local market.

From a series of form finding experiments with *origami* techniques, folding patterns suitable for creating medium or large span covers were selected. By manipulating the patterns, using *Rhinoceros 3D*, variations of the shapes with different heights were found, but keeping the span constant. Then, the structural behavior of the shapes was analyzed using RFEM. By dimensioning the shapes with the same material but different thickness, and equalizing the maximum deformations, the self-weight of each one per unit of covered surface (Kg/m^2) was compared. Finally, alternatives for increasing the stiffness of the shapes that showed a better structural behavior were analyzed through the incorporation of steel connecting rods and wires.

The optimization of shapes, based on analog and digital experiments, is essential for the subsequent parametric design and computer-aided manufacturing of prototypes.

Keywords: origami, structural morphologies, computer models, parametric design.

1. Introducción

El sector forestal uruguayo se encuentra en crecimiento y en los últimos años, desde diferentes organismos públicos, se ha incentivado el desarrollo de construcciones con madera. Esto ha generado un escenario propicio para la producción de materiales

estructurales derivados, con ingeniería incorporada, entre los que se destacan los tableros contrachapados y el CLT.

El pliegue, por otra parte, es una estrategia que permite incrementar la inercia geométrica y la rigidez de una superficie estructural. El *origami* es una técnica de plegado de papel milenaria que ha sido aplicada al diseño en diversas áreas y que puede ser utilizada para encontrar la forma de estructuras laminares eficientes, con resultados arquitectónicos muy atractivos cuando se resuelven con tableros derivados de la madera. Actualmente, existen programas informáticos que permiten simular y manipular fácilmente las formas plegadas, lo cual posibilita modelar estructuras complejas de forma paramétrica que luego sean analizadas y optimizadas con programas de cálculo.

2. Metodología

Se seleccionaron cinco patrones de un catálogo de formas con técnicas de *origami* desarrollado en una investigación previa [1]. Todos ellos conservan la planeidad de sus caras durante el proceso de pliegue y pueden, por lo tanto, quedar contenidos en un mismo plano al ser completamente plegados. Se trata de formas que, preliminarmente, se consideran apropiadas para cubiertas de espacios de luces medianas y grandes en función de sus cualidades resistentes, constructivas y estéticas. Los patrones seleccionados fueron bóvedas en V (BV01 y BV02), expansiones en V (EV02 y EV03) y el plegado Yoshimura (Y01), ver *Fig.1* y *Fig.2*. Con el objetivo de optimizarlos, fueron manipulados y escalados para cubrir una luz de 8 m. Inicialmente, fueron confeccionados con papel y luego se simularon digitalmente utilizando el programa *Rhinoceros 3D* que cuenta con el *plug in* de *Grasshopper*. También se aplicó el complemento *Crane*, para la simulación de plegados rígidos.

A partir de la forma digitalizada básica de cada patrón, se generaron series de distintas morfologías regulando la apertura del plegado. Los límites del proceso quedaron definidos entre una apertura máxima y una mínima. La máxima es la que produce una morfología plana en una vista superior (el patrón sin plegar), en tanto que la mínima es la que produce una forma totalmente cerrada y plana en una vista lateral (el patrón totalmente plegado). Las formas obtenidas quedaron comprendidas dentro de estos rangos y su número, varía para cada patrón. Cada morfología de la serie quedó definida por la relación entre su altura máxima y la luz entre apoyos.

Una vez obtenidas las morfologías con distintas proporciones de cada plegado, se extrajo una unidad mínima de cubierta o “faja prototipo”. El comportamiento teórico estructural de estas fajas fue analizado utilizando el programa RFEM y la norma EN 1990 [2]. La totalidad de los plegados fueron modelados como superficies planas, de rigidez ortótropa. El material se definió como tablero contrachapado clase F20/15 E30/25 según la norma EN 12369-2 [3]. Todos fueron sometidos a la misma combinación de cargas. Los vínculos entre los faldones se consideraron articulados y los apoyos externos fueron modelados como articulaciones fijas. Se calculó el espesor necesario del material para que todas las formas alcancen una misma deformación global. Se definió, a continuación, la relación entre el peso de la faja y el área cubierta como indicador de comportamiento para seleccionar aquellas con el mejor desempeño estructural de cada serie.

Con las cinco morfologías seleccionadas se modelaron cubiertas de siete fajas de ancho, manteniendo las mismas condiciones de luz, carga y apoyos. Finalmente, se analizaron alternativas para el incremento de la rigidez de estas cubiertas a través de la incorporación de distintas combinaciones de bielas y tensores de acero.

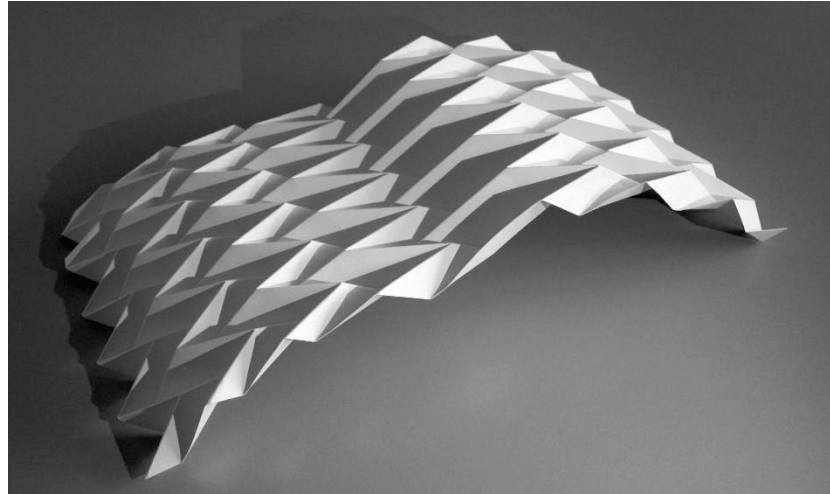


Fig. 1 – Imagen del patrón BV02, plegado con técnicas de *origami*.



Fig. 2 – Imágenes de los patrones BV01, BV02, EV02, EV03 y Y01, generadas en *Rhinoceros 3D*.

3. Resultados obtenidos

3.1. Resultados de la modelización de fajas

La faja del plegado BV01 más eficiente es la de relación entre altura y luz de 1 a 5, ya que presenta el menor peso por unidad de superficie, ver *Tabla 1* y *Fig. 3*. Aquellas con relaciones mayores y menores entre altura y luz presentan rendimientos menos eficaces. Las deformaciones horizontales, por otra parte, disminuyen cuando aumenta la relación entre la luz y la altura. La faja de proporción 1 a 5, si bien no es la de menor deformación horizontal, se consideró como óptima por presentar una deformación relativamente baja en su serie y la menor relación entre peso y superficie, ver *Fig. 4*.

En forma análoga se analizaron las fajas de los otros cuatro plegados: BV02, EV02, EV03, Y01, obteniéndose los resultados expresados en la *Tabla 2*.

Se analizaron diez fajas del plegado BV02. La que presentó un comportamiento más eficiente fue aquella con proporción entre altura y luz de 1 a 5,5, con una relación de peso por unidad de superficie de 48,21 kg/m². Sin embargo, esta morfología es la que presenta mayores deformaciones horizontales de su serie. Es de notar, no obstante, que el incremento observado en dichas deformaciones disminuye notoriamente a partir de la faja con relación 1 a 9.

Tabla 1 – Resultados del análisis de las nueve fajas del plegado BV01

Proporción altura/luz	1 a 3	1 a 3,5	1 a 3,75	1 a 4	1 a 4,5	1 a 5	1 a 5,5	1 a 6	1 a 7
Espesor (mm)	15	40,5	48	51	52,5	51	55	59	70
Peso de la faja (kg)	102,21	235,68	262,17	267,05	253,1	235,6	241,68	251,68	282,67
Def. horizontal (mm)	3,8	1,3	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Área cubierta (m ²)	2,86	6,01	6,55	6,83	7,19	7,32	7,42	7,47	7,52
Peso/Área cubierta (kg/m ²)	35,72	39,19	40,01	39,10	35,22	32,17	32,55	33,70	37,59

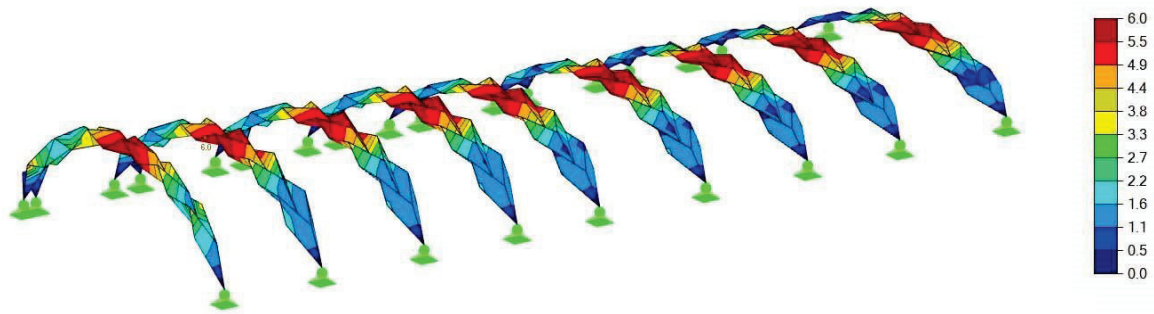


Fig. 3 – Deformaciones globales de las nueve fajas del plegado BV01,

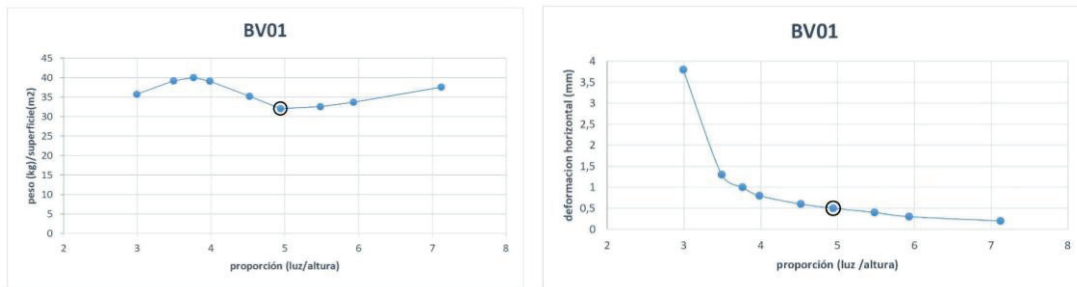


Fig. 4 – Gráficas peso/superficie y deformación horizontal, en función de las proporciones entre luz y altura de cada faja.

Se modelaron, asimismo, siete fajas del plegado EV02. La más eficiente resultó ser la de proporción entre altura y luz de 1 a 4, con una relación de peso por unidad de superficie de 34,27 kg/m². En cuanto a las deformaciones horizontales, tiene valores importantes si bien no son las máximas, del orden de seis veces mayores que la mínima. Esta morfología se encuentra próxima a la zona de plegado máximo.

Con respecto al plegado EV03, fueron analizadas nueve fajas y la más eficiente resultó ser la de proporción entre altura y luz de 1 a 9, con una relación de peso por unidad de superficie de 121,12 kg/m². Esta faja, además, presenta las menores deformaciones horizontales de su serie (aproximadamente el 13% del mayor valor).

Se estudiaron, finalmente, diez morfologías del plegado Y01, resultando la faja más eficiente la de proporción entre altura y luz de 1 a 6, con una relación de peso por unidad de superficie de 13,73 kg/m². Dicha faja se ubica en la zona donde el patrón se encuentra poco plegado, por lo cual presenta pequeños valores en las deformaciones horizontales (del orden del 17% de los mayores valores observados).

Tabla 2 – Información de las cinco fajas óptimas.

	BV01	BV02	EV02	EV03	Y01
Proporción altura/luz	1 a 5	1 a 5,5	1 a 4	1 a 9	1 a 6
Espesor (mm)	51	37,8	40	223	25
Peso de la faja (kg)	235,6	215,84	232,59	691,76	129,93
Def. horizontal (mm)	0,5	5,8	1,2	0,13	0,4
Área cubierta (m²)	7,32	4,48	6,79	5,71	9,46
Peso/Área cubierta (kg/m²)	32,17	48,21	34,27	121,12	13,73

3.2. Resultados de la modelización de cubiertas

Las deformaciones globales máximas de la cubierta modelada con la morfología óptima del plegado BV01 resultó un 23,3% de las deformaciones máximas de la faja aislada, mientras que las deformaciones horizontales aumentaron el 120%. Los desplazamientos en el eje vertical se modificaron levemente: los valores positivos aumentaron un 8,3% mientras que los negativos disminuyeron un 25%, aproximadamente.

En cuanto al plegado BV02, no se observaron diferencias significativas entre las deformaciones globales de la faja y de la cubierta. En cambio, las deformaciones horizontales resultaron 89% mayores en la cubierta, en tanto que las deformaciones verticales se redujeron un 16%, ver Fig.5.

Los valores de deformación de la cubierta modelada con el patrón EV02 presentan pequeñas diferencias con respecto a las deformaciones de la faja óptima. La deformación global disminuyó un 3%, las deformaciones horizontales aumentaron un 8,3%, mientras que las deformaciones verticales positivas aumentaron y las negativas disminuyeron un 11% y un 3%, respectivamente.

La cubierta modelada a partir del plegado EV03, por el contrario, tuvo un comportamiento muy diferente al de la correspondiente faja aislada. Las deformaciones horizontales se incrementaron un 500%, mientras que las deformaciones verticales casi no se vieron afectadas.

Por último, las deformaciones horizontales se incrementaron un 60% en la cubierta conformada con el plegado Y01, con respecto a la faja aislada. Las deformaciones globales aumentaron un 1,7%, mientras que las deformaciones positivas en vertical disminuyeron y las negativas aumentaron, ver Fig.6.

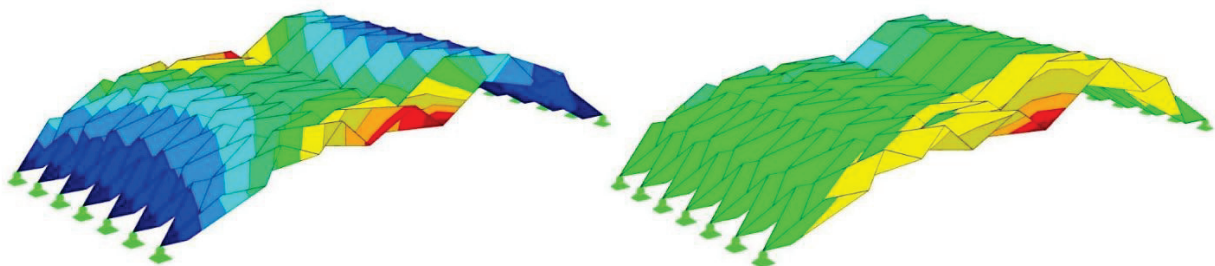


Fig. 5 – Deformaciones globales y horizontales de la cubierta del plegado BV02.

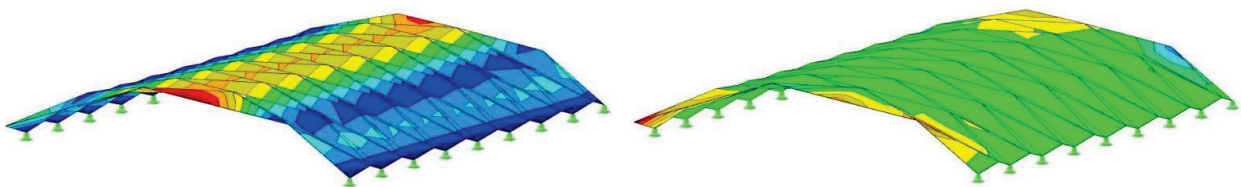


Fig. 6 – Deformaciones globales y horizontales de la cubierta del plegado Y01.

3.3- Resultados de la modelización de cubiertas reforzadas

Se incorporaron diferentes combinaciones de bielas y tensores a las cubiertas, con el objetivo de optimizar el comportamiento estructural.

Se incorporaron elementos comprimidos en los valles y las montañas centrales de las fajas externas de la cubierta modelada con el plegado BV01, dispuestos según una dirección perpendicular a la de las fajas. Con estos refuerzos, las deformaciones globales disminuyeron un 19,6% con respecto a la cubierta sin reforzar y un 38,3% con respecto a la faja aislada. Las deformaciones horizontales disminuyeron 27%, si bien resultan un 60% mayor que las de la faja aislada. Se lograron disminuir, no obstante, las deformaciones verticales.

En la cubierta reforzada en base al plegado BV02 también se observó una disminución de las deformaciones globales, llegando al 43% de las de la cubierta sin reforzar. Asimismo, las deformaciones horizontales disminuyeron considerablemente, resultando incluso menores que las de la faja aislada.

Con los refuerzos colocados en la cubierta modelada a partir del plegado EV02, fue posible disminuir todas las deformaciones, obteniendo valores menores a los de la faja aislada y a los de la cubierta sin reforzar, ver *Fig. 7*.

El caso de la cubierta conformada con el plegado EV03 fue similar al de la BV01. Todas las deformaciones disminuyeron, a excepción de las horizontales con relación al estudio de la faja aislada, ver *Fig. 8*.

La cubierta reforzada modelada a partir del plegado Y01 presentó pocas variaciones, las deformaciones globales disminuyeron un 3% y las horizontales no se modificaron. Los valores positivos de las deformaciones verticales aumentaron mientras que los negativos bajaron 4% y 3%, respectivamente.

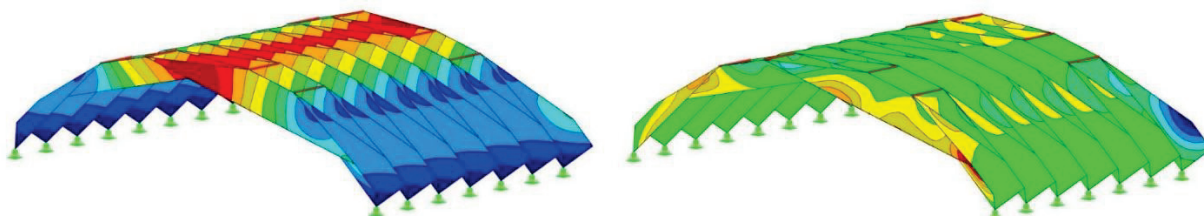


Fig. 7 – Deformaciones globales y horizontales de la cubierta reforzada del plegado EV02.

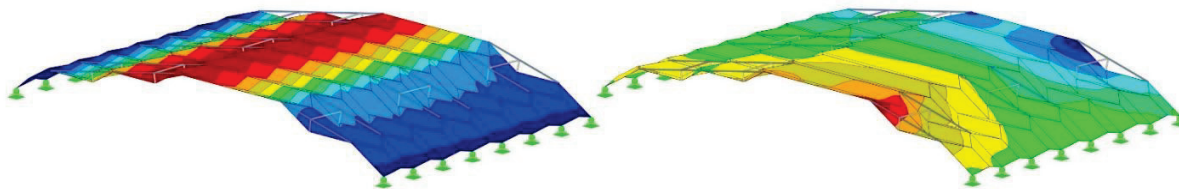


Fig. 8 – Deformaciones globales y horizontales de la cubierta reforzada del plegado EV03.

4. Conclusiones

Las deformaciones globales de las cubiertas disminuyen, en la mayoría de los casos, con respecto a las de las fajas aisladas, aunque aumentan las deformaciones horizontales. Este incremento de las deformaciones horizontales puede controlarse incorporando bielas y tensores de refuerzo.

El comportamiento de las fajas externas de las cubiertas es diferente al de las fajas centrales. En las primeras, en general, se observan las mayores deformaciones. Es posible uniformizar el comportamiento de las distintas fajas, no obstante, incorporando bielas y tensores de refuerzo.

La incorporación de refuerzos estructurales en los plegados, estratégicamente dispuestos, mejoran el desempeño. La única excepción fueron las morfologías derivadas del plegado Y01 que no mejoraron, sustancialmente, con esta estrategia. Este hecho reafirma la alta eficiencia de su forma inicial plegada en base a triángulos, la cual ya había sido puesta en evidencia a partir de la baja relación que presenta entre peso y área cubierta, ver *Tabla 2*. En la cubierta en base al plegado BV02 reforzada, se observó una notoria mejoría del desempeño estructural, con valores de deformaciones horizontales menores a los obtenidos en la faja aislada.

Es necesario estudiar el costo añadido en relación al beneficio obtenido en la mejora del desempeño, en aquellas morfologías que presentan escasas variaciones con la incorporación de refuerzos, así como validar estos resultados teóricos con ensayos en prototipos.

5. Referencias

- [1] Fontana J, Pereyra P, Piñeyro M, Abal B, Chocca C, Torán S, Lapeyre F. *Cubiertas laminares con estructura de madera, diseñadas y fabricadas con procesos asistidos por computadora. Su aplicación en edificios educativos*. Montevideo: Gráfica Mosca; 2022.
- [2] Asociación Española de Normalización. *Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras*. (UNE-EN 1990:2019).
- [3] Asociación Española de Normalización. *Tableros derivados de la madera. Valores característicos para el cálculo estructural. Parte 2: Tablero contrachapado*. (UNE-EN 12369-2:2011).

Cómo citar: K. Crosa, J. J. Fontana, M. Piñeyro, y V. Vila, «Formas plegadas optimizadas para el desarrollo de cubiertas con tableros derivados de la madera», en *XL Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural: Memorias*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, oct. 2024, pp. 229-235. [En línea]. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/44900>