

Kerfing²: Una técnica para el diseño, fabricación y optimización de elementos de doble curvatura a partir de placas rígidas de madera

Kerfing²: A technique for the design, manufacture and optimization of double-curved elements from rigid wooden plates

Mauricio Loyola

Universidad de Chile, Chile
mloyola@uchile.cl

Sebastián Caldera

Universidad de Chile, Chile
caldera@ug.uchile.cl

Sebastián Rozas

Universidad de Chile, Chile
gt2p Great Things To People, Chile
sebastianrozas@gt2p.com

Abstract

We present a novel technique for the design, optimization, and fabrication of plywood double-curvature building components, based on an ancient woodworking method known as kerfing. We explain the principles of geometric optimization, their implementation into computational algorithms, and show the first prototypes as proofs of concept (PoC).

Keywords: CAD/CAM; Digital Fabrication; Kerfing; Complex Geometries

Introducción

Una tendencia mundial importante en la arquitectura contemporánea es el uso de superficies de forma libre. Los edificios de arquitectos internacionales como Zaha Hadid o Frank Gehry representan, quizás, los casos más conocidos y extremos de esta tendencia, pero las superficies complejas están presentes de un modo más sutil en un gran número de proyectos, cruzando todo tipo de localizaciones, usos, dimensiones y materialidades.

No obstante su popularidad, este tipo de geometrías basadas en dobles curvaturas plantean importantes desafíos técnicos para su construcción, especialmente en el contexto Latinoamericano.

A nivel internacional, estas superficies construyen con métodos que requieren del diseño y fabricación de elementos únicos, con métodos intensivos en tecnología manufacturera avanzada y materiales sintéticos o de alta sofisticación industrial.

Estos métodos no son aplicables en Latinoamérica debido a limitaciones económicas y técnicas. En esta región, la solución más común, aunque no ideal, consiste en discretizar las curvaturas en secciones planas variables construidas con materiales rígidos tradicionales, lo que representa una renuncia en fidelidad geométrica a cambio de factibilidad de fabricación.

En respuesta a este problema, en este trabajo presentamos una técnica innovadora para el diseño, optimización y fabricación de elementos constructivos de doble curvatura sin pérdida de fidelidad geométrica usando tableros madera contrachapada. Este material es de bajo costo y de amplio uso

en construcción. La técnica propuesta no requiere el uso de moldes o métodos húmedos de flexión, permitiendo su utilización en todo tipo de proyectos, incluso en contextos con recursos tecnológicos o económicos limitados.

La técnica propuesta está inspirada en una antigua técnica artesanal de ebanistería, pero potenciada con el uso innovador de herramientas digitales de optimización por diseño paramétrico y fabricación por manufactura digital.

La técnica tradicional, que genéricamente se puede denominar ranurado (*kerfing*, en inglés) consiste en realizar pequeñas y sucesivas incisiones en la madera de forma de debilitar el material a un punto tal en que se pueda flexionar para alcanzar la curvatura deseada (Figura 1). Este procedimiento, aunque útil, es ineficiente ya que debilita excesivamente a la pieza y es muy lento e intensivo en trabajo manual.

Nuestra técnica propuesta considera el uso de herramientas digitales de diseño y optimización para calcular la cantidad y geometría de las ranuras (angulación, profundidad, distanciamiento, etc.) y minimizar los cortes sólo a lo estrictamente necesario, aumentando la resistencia mecánica de la pieza final y disminuyendo el tiempo de fabricación.

La técnica permite la fabricación de piezas de madera de curvatura simple y doble con gran precisión, a un costo muy competitivo frente a otras soluciones constructivas. Los elementos fabricados pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones arquitectónicas, adquiriendo roles ornamentales, funcionales, de revestimiento o incluso de colaboración estructural menor.

En este artículo, explicamos los principios geométricos de los métodos de optimización, su aplicación en los algoritmos

computacionales, la técnica de fabricación propuesta, y mostramos los primeros prototipos a escala real como pruebas de concepto.

Antecedentes

Aunque la idea del ranurado se podría remontar hasta los orígenes de la ebanistería, durante siglos la técnica se mantuvo restringida exclusivamente a pequeños objetos de madera, tales como instrumentos musicales. Sólo en los últimos años la técnica ha comenzado a ser revisada utilizando las capacidades de las nuevas herramientas computacionales. Algunos precedentes relevantes incluyen los trabajos de estudiantes en GSD Harvard (Menges 2010), MIT (Hoffer y col 2012), e instalaciones artísticas (Lai et al 2013). Algunos productos comerciales de revestimientos para diseño interior utilizan principios similares (Kerfkore 2016). Todos estos proyectos y productos están basados en ranuras rectas y unidireccionales, permitiendo fabricar sólo superficies regladas de curvatura simple.

Otra técnica basada en ranuras que se ha crecido en popularidad con la masificación de equipos de corte láser es el uso de bisagras falsas (*living hinges*, en inglés), referido a un patrón de corte de ranuras paralelas desfasadas, por el cual un material plano rígido adquiere flexibilidad. El principio básico es la discontinuidad planar. El material se reconfigura como un conjunto de elementos largos que se torsionan en el sentido de su eje mayor cuando el material se somete a cargas de flexión (“elementos torsionales”), conectados entre ellos por elementos longitudinales cortos y rígidos (“enlaces”). La sección y la longitud de estos elementos torsionales determinan la elasticidad del sistema (Fenner, 2011).

Extrapolar estos principios mecánicos a superficies de doble curvatura no es una tarea sencilla, ya que estas geometrías requieren tanto expansión y compresión de área en el plano para permitir curvaturas anticlásticas y sinclásticas. Por ejemplo, Porterfield (2015) reporta ensayos con distintos patrones de ranurados sin lograr resultados satisfactorios. Algunos precedentes exitosos incluyen los productos desarrollados por Laro (2010), Curtius (2012), y por la empresa Dukta (2016). Aunque estos casos son satisfactorios en el logro de doble curvatura, tienen dos problemas importantes: a) requieren piezas con secciones mayores (>50mm) y b) consideran cortes homogéneos en toda la extensión de la pieza sin ninguna optimización. En otras palabras, sufren las mismas ineficiencias mecánicas y de fabricación que la técnica tradicional.

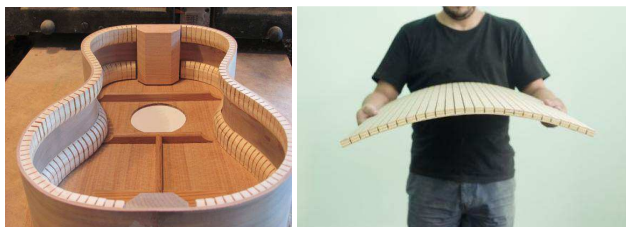


Figura 1: Izq: Uso de ranurado tradicional en instrumentos musicales (créditos imagen: MIT). Der: Principio básico del ranurado tradicional (créditos imagen: autores).

Metodología

Dada la dificultad del desafío técnico, el desarrollo de la técnica fue enfrentada en un proceso de tres fases correspondientes a tres casos de complejidad creciente:

- 1) Superficies regladas de curvatura simple (caso base)
- 2) Superficies regladas de doble curvatura anticlástica
- 3) Superficies no regladas de doble curvatura compuesta

Para cada fase y caso, la primera tarea fue realizar una aproximación exploratoria fabricando prototipos con patrones que replicaban soluciones conocidas sin optimización alguna. Los prototipos fueron fabricados con MDF 3mm y una cortadora láser. El objetivo de esta aproximación fue ganar familiaridad con el problema técnico y obtener una intuición respecto de posibles soluciones. La segunda tarea fue la descripción y caracterización sistemática del problema en términos geométricos y mecánicos, de manera tan precisa y técnica como fuera posible. Se utilizaron las herramientas Rhino 3D y Autodesk Inventor para el modelado geométrico y Microsoft Excel para los cálculos mecánicos. La tercera tarea fue el planteamiento de potenciales soluciones (patrones de corte) basadas en los análisis geométricos y mecánicos. Todas las ideas planteadas fueron prototipadas con MDF 3mm y examinadas con magnificación óptica, fotografías normalizadas y teñido de caras exteriores para evidenciar su comportamiento mecánico y geométrico. Los patrones con mejor desempeño fueron posteriormente sistematizados en algoritmos en Grasshopper 3D, iniciando un proceso cíclico iterativo de prototipado físico, examinación de modelos, análisis geométrico-mecánico y modelado digital.

Las tres subsecciones siguientes describen los principios geométricos y algoritmos de optimización con mejor desempeño para cada uno de los tres casos.

Caso 1: Superficies regladas de curvatura simple (caso base)

El objetivo de este caso fue obtener una optimización de la técnica tradicional de ranurado, reduciendo el número de cortes al mínimo necesario.

El algoritmo propuesto requiere como variables de entrada una curva de perfil (directriz de la superficie objetivo), la carga de flexión que ha de aplicarse, la herramienta de corte a utilizar (espesor de corte), y las propiedades físicas (dimensiones, rigidez, etc.) de la pieza de madera. Debido a que se trata de una superficie reglada simple de traslación, el algoritmo se simplifica para operar bidimensionalmente con la curva de perfil, y luego extrapolar los resultados tridimensionalmente a la superficie. El principio geométrico es la localización de ranuras por medio de un proceso recursivo bajo la condición que se mantenga un ángulo constante entre cada conjunto de tres puntos consecutivos. Este ángulo crítico está dado por el factor de compresión de la ranura, el cual a su vez está determinado por la carga de flexión y las propiedades mecánicas de la madera. Para generar el patrón de corte, se toman los puntos identificados en la curva como marcas de posición para cortes rectos en el tablero de madera de todo el largo de la pieza. Por medio de este procedimiento,

cuando la pieza final de madera es sometida a la carga considerada, la pieza se flexa naturalmente y se obtiene la curva objetivo. En comparación con el ranurado tradicional, esta técnica puede lograr la misma curvatura final hasta con un 75% menos de cortes necesarios.

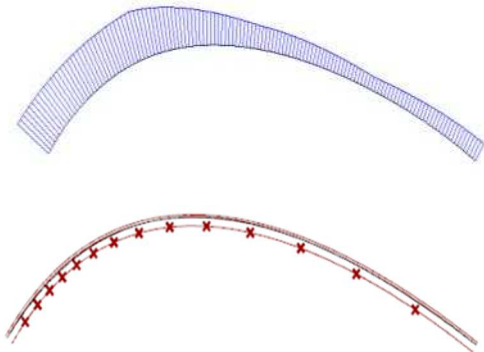


Figura 2: Arriba: Diagrama de curvatura de curva referencial. Abajo: Ubicación de puntos de ranurado identificados con el algoritmo (créditos imagen: autores).

Caso 2: Superficies regladas de doble curvatura anticlástica

El objetivo de este caso fue obtener una optimización y expansión de la técnica de bisagra falsa, para permitir su uso en superficies regladas de doble curvatura anticlástica.

El algoritmo propuesto requiere como variables de entrada la superficie objetivo y las propiedades físicas (dimensiones, rigidez, etc.) de la pieza de madera. El principio geométrico y mecánico para lograr una optimización es la reducción de los elementos torsionales al mínimo necesario para lograr la curvatura. El algoritmo comienza calculando la torsión máxima admisible para una sección cuadrada de lado equivalente al espesor de la pieza, en base a las propiedades mecánicas de la madera. Con este parámetro, se estima el ángulo de torsión máximo admisible, y en base a ello, la cantidad y largos de elementos torsionales necesarios en relación a un ángulo de curvatura dado. Para una pieza curva de curvatura constante, bastaría con generar un patrón uniforme con la cantidad de elementos torsionales necesarios para el ángulo de curvatura. Para una pieza de doble curvatura anticlástica donde la curvatura es variable en cada punto, es necesario hacer un cálculo adicional. El algoritmo primero divide la superficie en franjas paralelas en el sentido de las reglas y de ancho equivalente a 2 veces el espesor de la pieza. Luego, se calcula la curvatura gaussiana media para cada franja y ese valor se utiliza para determinar la cantidad y longitud de elementos torsionales necesarios. Cuánto más curvatura, se requiere más cantidad y más longitud de elementos torsionales.

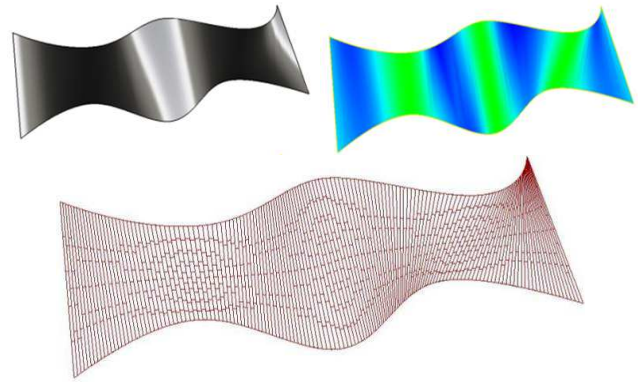


Figura 3: Arriba: Superficie referencial y diagrama de curvatura gaussiana. Abajo: Patrón de corte optimizado.

Caso 3: Superficies no regladas de doble curvatura compuesta

El objetivo de este caso fue lograr la anhelada pero compleja doble curvatura con geometrías anticlásticas y sinclásticas. Este es, por lejos, el caso más difícil pues requiere que la madera se contraiga y expanda en su plano sin perder continuidad. Evidentemente, es técnicamente imposible lograr esto sin remover material y generar espacio libre para la compresión y expansión de la pieza, por lo que la “continuidad” del tablero no es absoluta. Sin embargo, por medio de un eficiente diseño, es posible reducir la cantidad de material removido al mínimo necesario para obtener la curvatura deseada y generar una pieza suficientemente continua como para ser usada en contextos de construcción.

El algoritmo propuesto requiere como variables de entrada la superficie objetivo de doble curvatura, las propiedades físicas de la pieza de madera y un parámetro de tolerancia máxima admisible.

El principio geométrico y mecánico fundamental es el uso de un motivo de tres brazos con simetría central (“Y”) que permite torsión rotacional en el plano. Este motivo, simple pero eficiente, permite la expansión y compresión de la superficie dependiendo del sentido de rotación. Otros motivos con simetría central con diferente cantidad de brazos también fueron puestos a prueba, con resultados similares o incluso inferiores al propuesto aquí. La operación del algoritmo es sencilla. En base a las propiedades mecánicas de la madera, se determina la torsión rotacional máxima admisible y la expansión y contracción superficial relativa al tamaño (radio) de motivo. Luego, se calcula la curvatura gaussiana media de toda la superficie y se determina el tamaño de motivo medio requerido en base a la contracción y expansión superficial. En este punto, el patrón de corte es homogéneo en toda la superficie. Finalmente, se utiliza un algoritmo recursivo para relajar el patrón de corte según la curvatura gaussiana de cada punto de la superficie hasta alcanzar una desviación máxima entre superficie teórica y propuesta equivalente al parámetro de tolerancia máxima admisible. Así, en las zonas con mayores valores de curvatura, aumenta la densidad de cortes, permitiendo mayor expansión o compresión del material. Donde la curvatura gaussiana tiende a cero, el número de cortes disminuye, aumentando la rigidez del

tablero. Este algoritmo, aunque no es perfecto, es una solución eficiente y elegante para este problema.

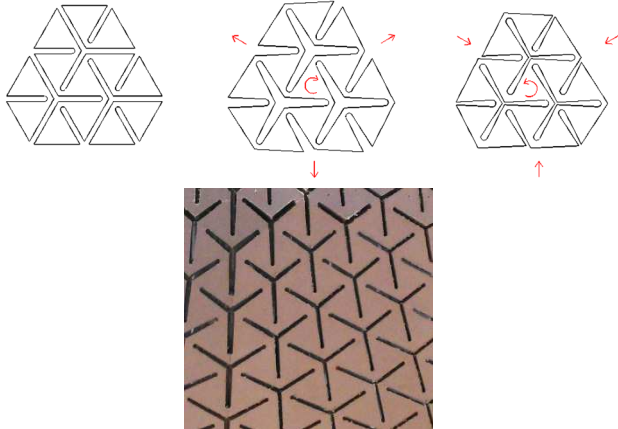


Figura 4: Arriba: Motivo en “Y” con rotación expansiva y contractiva. Abajo: Madera ranurada con motivos “Y” sometida a carga de flexión. Note la diferencia entre la zona izquierda superior (zona de expansión, ranuras expandidas) y la zona derecha inferior (zona de contracción, ranuras comprimidas).

Resultados

Prueba de Concepto (PoC)

Como prueba de concepto, se fabricaron prototipos a escala real para cada caso utilizando las técnicas propuestas. Todos los prototipos tienen una dimensión de 90cm x 200cm y se fabricaron con madera contrachapada de pino de 5 tulipas de 12mm de espesor (caso 1), MDF de 12mm (caso 2) y MDF de 9mm (Caso 3). Las superficies objetivas están basadas en líneas rectas y arcos con una altura máxima de 24 cm respecto a la horizontal. Los patrones de corte fueron generados con Grasshopper 3D usando los algoritmos descritos previamente y luego cortados en madera usando un router de fresado CNC con fresas de corte de 3mm de diámetro. El prototipo del caso 1 también pudo haber sido fabricado utilizando una sierra circular manual. Todos los prototipos se ensamblaron en seco, a mano, y se fijaron con tornillos y/o clavos de 30mm utilizando una clavadora neumática.

Las figuras 6 a 8 muestran los 3 prototipos finales. Cada figura muestra, en la fila superior, de izquierda a derecha, la superficie objetivo modelada en Rhino3D, el diagrama de análisis gaussiano, y el patrón de corte optimizado generado con Grasshopper. En la fila inferior hay fotos que muestran el prototipo físico y sus detalles. En el diagrama gaussiano, rojo y naranja indican curvatura positiva o sinclástica, azul y celeste indican curvatura negativa o anticlastica y verde muestra desarrollabilidad o curvatura cero.



Figura 5: Proceso de fabricación de prototipos a escala real

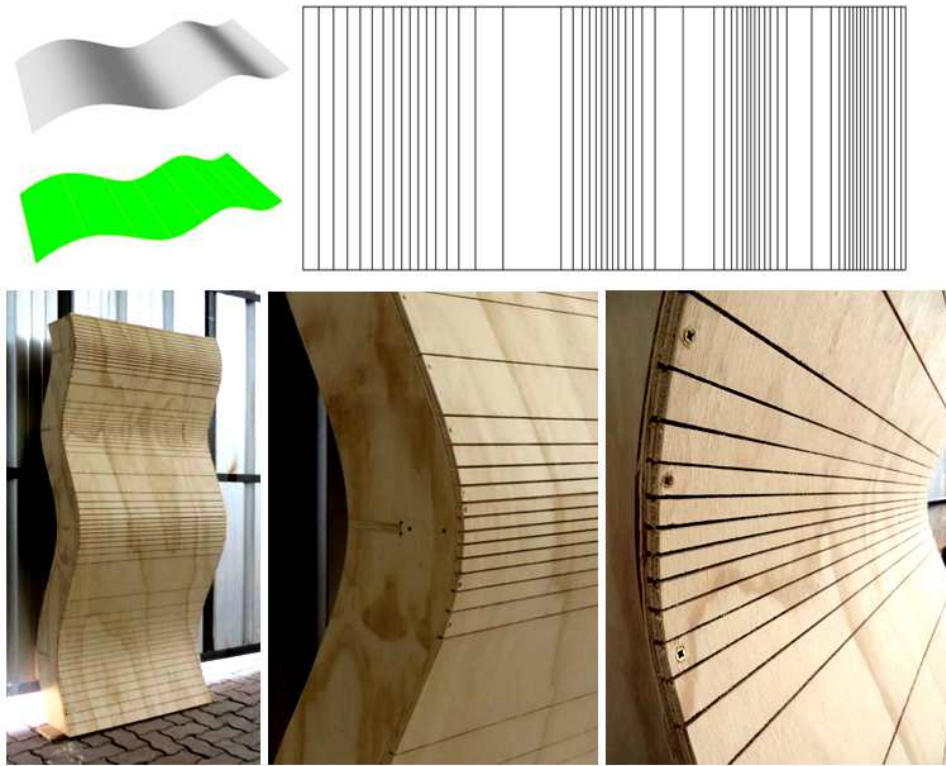


Figura 6: Prototipo Caso 1

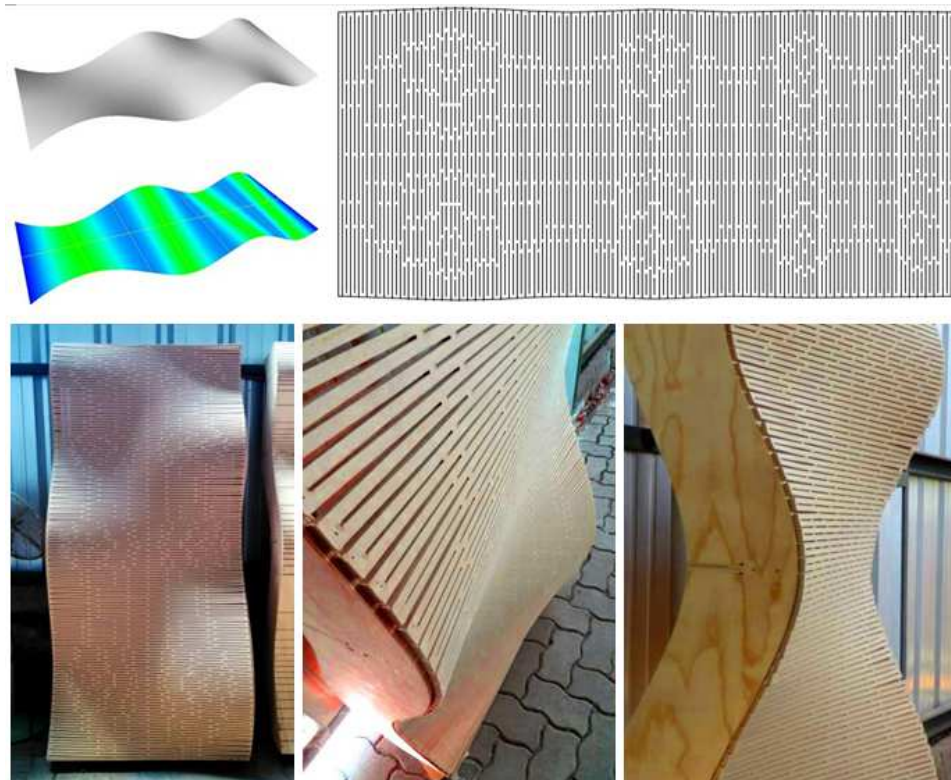


Figura 7: Prototipo caso 2.

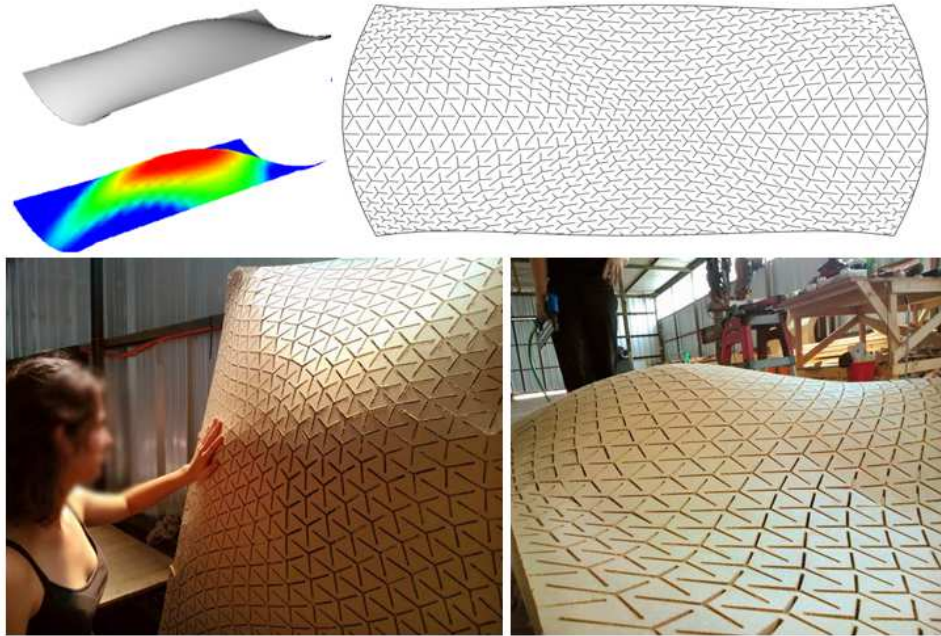


Figura 8: Prototipo caso 3

Evaluación mecánica

Además de los prototipos a escala real, una serie de ensayos mecánicos se llevaron a cabo con el fin de evaluar la pérdida de resistencia que conlleva esta técnica.

Se ensayaron veintiocho probetas de madera contrachapada de 5 tulipas, de 12mm de espesor, y dimensiones 130x400x12mm, con 14 variaciones diferentes en la geometría de corte (distancia, profundidad y espesor; 2 especímenes por variación) en una máquina de ensayo universal INSTROM® (UTM). Se realizó un ensayo de flexión de 3 puntos para determinar módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR) para cada muestra.

Los resultados muestran que, como era de esperar, las probetas ranuradas experimentan una fuerte caída en resistencia en comparación con el control (pieza sin ranurar). Sin embargo, existen enormes diferencias entre cada muestra, lo que demuestra que la geometría de los cortes es crítica para determinar la resistencia de la pieza. El espécimen con el mejor rendimiento obtuvo un MOE = 15.7 MPa y un MOR = 357.5 MPa, equivalente a una reducción aproximada del 60% respecto del control.

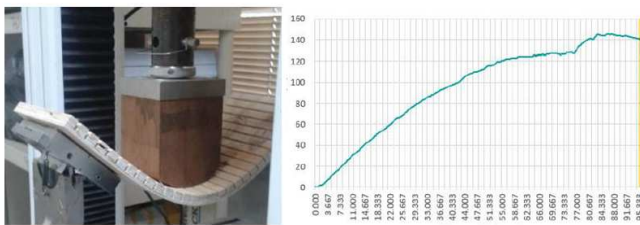


Figura 9: Evaluación mecánica-estructural

Conclusiones

En este trabajo, presentamos los principios básicos de una técnica innovadora para el diseño, optimización, la fabricación de superficies de doble curvatura usando tableros rígidos de madera contrachapada. La técnica es sencilla, versátil y competitiva en contextos con limitados recursos tecnológicos. Sus principales aplicaciones incluyen productos arquitectónicos de revestimiento de terminación o performativos (ej. paneles acústicos), mobiliario, y sustratos no estructurales.

Los algoritmos de optimización demostraron ser funcionales. En todos los casos se redujo significativamente la cantidad de cortes necesarios en comparación con los métodos tradicionales de ranurado. Sin embargo, los algoritmos son todavía computacionalmente ineficientes y limitados en el número de superficies que pueden analizar. El algoritmo para el caso 3 no funciona correctamente cuando la curvatura de la superficie de entrada es extrema, aunque esto podría considerarse una limitación inherente e ineludible del objetivo tecnológico.

Los prototipos físicos muestran que el principio tecnológico es factible, pero requiere mejoras. En particular, el uso de un router CNC para realizar los cortes, aunque eficaz, parece ser lento y costoso, por lo que se considera necesario evaluar otras alternativas.

Una debilidad del sistema propuesto es la subestructura necesaria para apoyar las superficies curvas. Aunque las pruebas mecánicas demostraron que el ranurado es capaz de realizar algún trabajo mecánico menor, la subestructura usada en los prototipos de escala real parece sobredimensionada y difícilmente escalable a una solución industrial y comercial.

En conclusión, los resultados preliminares muestran que la técnica propuesta es factible, innovadora, valiosa, y conveniente de continuar desarrollándose con etapas posterior de I+D para su eventual transferencia al mercado.

Agradecimientos

Agradecemos a Pablo Vega, Mathilde Marcantoni, Nicolás Espinoza y Constanza Montiel, quienes colaboraron con la fabricación, ensayo, y análisis de los prototipos. Agradecemos muy especialmente al CONICYT Chile, que a través del fondo InnovaCORFO financió esta investigación.

Referencias

- Curtius, Alejandro. 2012. Lieja nach dem Duktaprinzip # 3. Disponible en:
[Http://www.alexandercurtius.ch/moebel/liegen/details/article/liege-nach-dem-duktaprinzip-3/](http://www.alexandercurtius.ch/moebel/liegen/details/article/liege-nach-dem-duktaprinzip-3/)
- Dukta GmbH 2016. Dukta: Flexible Wood [Descripción del producto]
Disponible en: <http://www.dukta.com>
- Fenner, Patrick. 2011. Bisagras de Lattice Living con corte por láser. Disponible en:
<https://www.deferredprocrastination.co.uk/blog/2011/laser-cut-lattice-living-hinges/>
- Hoffer, Brian; Mackey, Chris; Miranowski, Dave; Y Crain, Tyler. 2012. KERF. Competición del Pabellón IAP. Disponible en:
http://web.mit.edu/cron/project/kerf/OldFiles/7_Presentation/KERF_Documentation_Summary.pdf
- Kerfore Company, Inc. 2013. Kerfore [Descripción del producto]
Disponible en: <http://www.kerfkore.com/kerfkore.html>
- Lai Wing Fung; Choi Kit Wang; Chan Yiu Kwan; Y así Tze Shun. 2013. JUPYEAH // Banco de afeitar de madera. PRODUCCIÓN HOUR25. Disponible en: <http://www.hour-25.com/>
- Laro, Carolien. 2010. Piernas inquietas: Madera de la primavera - verend hout. Disponible en:
Http: // [www. Carolienlaro.nl/portfolio/portfolio%20informatie/restlesslegs01.htm](http://www.carolienlaro.nl/portfolio/portfolio%20informatie/restlesslegs01.htm)
- Menges, Achim. 2010. Sistemas de madera compleja basados en Kerf. Estudio Performativo de Madera, Harvard GSD.