

# Muro-pixel: exploración digital de un sistema constructivo de placas entrelazadas

Pixel-Wall: Digital Exploration of a Constructive System Based on Interlocked Boards

**Underléa Miotto Bruscato**

Unilasalle/Unisinós, Brasil

✉ bruscato@unilasalle.edu.br

**Rodrigo García Alvarado**

Universidad del Bío-Bío, Chile

✉ rgarcia@ubiobio.cl

## ABSTRACT

This paper reports the initial development of a constructive system based on interlocked boards manufactured through digital fabrication. The system is based on the elaboration of grooves in regular pieces by a laser-cutter or CNC-machines to develop self-supported configurations. A parametric design system has been designed and several material models and full-scale prototypes have been built. Although the system requires evaluation of its structural features, production and maintenance, it offers novel building alternatives. This experience set up an innovative way of performing experimental research to develop new products and possible designs.

**KEYWORDS:** digital fabrication, constructive system, parametric design, flexible wall, assembly.

Este trabajo expone el desarrollo de un sistema constructivo denominado *muro-pixel*, basado en placas entrelazadas elaboradas con modelación paramétrica y fabricación digital, que logra diversos atributos técnicos y posibilidades de diseño, como una experiencia académica de investigación experimental que pretende fomentar estrategias de innovación arquitectónica.

Las tecnologías de manufactura y programación digital sugieren nuevas posibilidades productivas en arquitectura, al fomentar una industrialización flexible de la construcción (Kieran y Timberlake, 2004). Así mismo, estos sistemas y equipamientos han demostrado la capacidad de ejecutar novedosas formas complejas con elementos existentes (Gramazio y Kohler, 2008). Además, esta experiencia del muro-pixel formula nuevas configuraciones a partir de un componente constructivo que invierte el proceso de diseño convencional, en que usualmente se resuelven primero las formas globales y luego los elementos menores. En este caso, se define el sistema de ejecución y luego se exploran sus posibilidades generales.

Se han desarrollado diversas experiencias de paramentos con fabricación digital, como las expuestas por Caldas y Duarte (2005), Bonswetch et al. (2006), Zisimopoulou y Fragkiadakis (2006), Menges (2009) y Oesterle (2009). Aunque se han concentrado en la elaboración de instalaciones específicas y

no en el desarrollo de sistemas generales. Botha y Sass (2006) plantearon viviendas masivas, y Ambrose et al. (2009), un ladrillo articulado para generar configuraciones curvas; pero no han sido mayormente desarrollados.

El sistema se originó en la capacidad de trabajo de una cortadora láser de mediano formato, con la subdivisión de planchas industriales en piezas del área máxima de la cortadora, inicialmente placas en MDF, que otorgan un bajo costo de ejecución y capacidad de ensamble para ejecutar configuraciones autosoportantes. Así se estudiaron digitalmente distintas secuencias de entrelazamiento ortogonal, que generan paramentos continuos con diferentes grados de apertura. Luego se elaboraron modelos a escala para experimentar algunas propiedades físicas de estabilidad, iluminación y tratamiento. Además de piezas con ranuras inclinadas para generar configuraciones curvas que otorgaran mayor apoyo estructural y variedad formal.

Los modelos curvos fueron experimentados, para determinar deformaciones generales y secuencias de ejecución. Adicionalmente, se realizaron estudios con *software* de análisis estructural para revisar las capacidades resistentes y alternativas de materiales en placas de madera compuesta, fibrocemento o acero. Luego de las pruebas iniciales, se efectuó una programación paramétrica según las características geomé-

tricas establecidas, para desarrollar distintas configuraciones con la modelación de los componentes, la cuantificación de placas involucradas y el trazado de corte.

El último paso fue la ejecución de prototipos a tamaño real, evaluando el proceso de ejecución y el desempeño físico, principalmente en paramentos verticales y coberturas abovedadas. El sistema permite tener paramentos para paneles divisorios, estantes decorativos, fachadas ventiladas, cielos acústicos, techumbres o envolventes completas, con una variedad de diseños, grados de transparencia, ventilación y capacidad estructural en placas entrelazadas de distintos materiales, aplicando modelación paramétrica y fabricación digital. Así se logra una gran flexibilidad, versatilidad funcional, rapidez de montaje y bajo costo.

### Producción material

Esta experimentación pretende explorar el desarrollo de un paramento constructivo, con algunos atributos técnicos mejorados respecto a las soluciones convencionales, basado en la tecnología de producción digital. En la elaboración inicial se usó una cortadora láser Mercury de fuente CO<sub>2</sub>, enfriado por aire con una potencia de 40 W y área de trabajo de 63,5 × 45,7 × 16,5 cm de altura. El área de trabajo tiene puertas laterales que permiten introducir materiales de mayor longitud, pero no se conserva la precisión adecuada para cortes continuos. La resolución de corte es hasta 1.000 dpi.

El haz láser se proyecta en vertical (de arriba hacia abajo) y se desplaza horizontalmente en ambos ejes. De este modo, puede realizar cortes de gran precisión y versatilidad, pero su trabajo en profundidad solo es direccional (no puede realizar cortes inclinados) y de intensidad variable. La altura de trabajo es regulable, depende del material e incluso el fabricante no da indicaciones precisas al respecto, pues sugiere probar según los materiales la intensidad y velocidad apropiada para el corte.

Una intensidad o velocidad leve permite grabar el material y crear una escisión parcial en el espesor. También se pueden realizar cortes consecutivos para aumentar la profundidad, pero ocasionalmente esto va incinerando excesivamente los bordes. De modo que los materiales trabajados son de espesor reducido. También es relevante considerar tiempos reducidos de operación. En las cortadoras láser el único consumo es energía eléctrica y mayormente tiempo de operario (tanto en el corte como en revisión y preparación de archivos); por lo tanto, la rapidez de producción es el mayor insumo.

Del mismo modo, en otras tecnologías de manufactura digital de mayor flexibilidad, las capacidades requieren vastos tiempos de producción y preparación, que limitan experimentaciones. Equipamientos de esta magnitud pueden trabajar fácilmente cueros, cartones, tableros delgados de madera y plásticos. Elementos metálicos o vidrios solo pueden ser

grabados. Piezas de madera entera, gruesas o tableros estructurales poseen un mayor tiempo de corte (exigen varias pasadas) y, a veces, se queman excesivamente (al poseer fibras en varios sentidos).

Después de variadas experimentaciones se comprobó que los tableros reconstituidos de MDF poseían la mejor combinación de rigidez y velocidad de operación (el cuero y cartón son más rápidos de cortar, pero muy flexibles para ejecutar elementos constructivos; otros materiales más rígidos son más difíciles de cortar). El formato de 61 × 38 cm permite lograr una alta magnitud de ocupación del área de trabajo y subdividir la plancha comercial, para obtener 16 piezas por placa. Con una proporción rectangular que permitiera luego combinaciones con tendencia longitudinal en altura o extensión.

Las placas en MDF son tableros de fibras de madera de pino radiata, unidas por adhesivos de ureaformaldehído. Las fibras de madera son obtenidas mediante un proceso termomecánico y unidas con un adhesivo que se polimeriza a través de altas presiones y temperaturas (una densidad de 730 a 820 kg/m<sup>3</sup>, una flexión de 40 a 45 N/mm<sup>2</sup> y una tracción de 1 N/mm<sup>2</sup>, su hinchamiento a las 24 horas es de máximo 30 a 37, con un contenido de humedad entre 5% y 11%). Sus dimensiones de producción poseen una tolerancia de ± 2,0 mm/m. De manera alternativa se consideraron tableros melamínicos (con una terminación exterior vinílica de mejor resistencia a la humedad y presentación), de fibra orientada (con mayor resistencia estructural y humedad) y plástico-madera (todavía en experimentación, con mayor durabilidad y presentación, aunque sus capacidades estructurales y maleabilidad están en desarrollo).

Para la producción con cortadora láser se dispone de un archivo CAD, con el trazado de las piezas que se van a cortar según un formato proporcional al tamaño del material, dentro del área de trabajo. Al combinar con trazados por grabar, estos se colocan en otro *layer*. Se debe cuidar la superposición de trazados, de modo que cualquier preparación geométrica o modelo tridimensional debe ser dispuesto y despejado, según los perímetros correspondientes de corte y dimensiones. Naturalmente, la distribución de piezas y contigüidad de cantos debe reducir trazados y material sobrante.

### Diseño geométrico

Las piezas básicas (placas de 61 × 38 cm y espesor reducido) se pueden ensamblar entre sí usando ranuras de encaje elaboradas con manufactura digital. Debido a que las ranuras solamente pueden ser verticales, el ensamble entre piezas tiene que ser perpendicular, para garantizar un apoyo más resistente. En este sentido, el módulo esencial está constituido por un par de piezas perpendiculares. El ensamble ejecutado en sus extremos le otorga mayor alcance a este módulo esencial. Una secuencia lineal se arma con los módulos o piezas encadenadas entre los extremos opuestos, conformando hiladas.

Luego, para superponer hiladas, se estableció una ranura intermedia que entrelaza las piezas en el eje vertical, lo cual permite una capacidad autosoportante en este sentido. La longitud de esta ranura determina el desplazamiento entre hiladas y genera un espacio de ventilación entre las piezas. También se pueden considerar las ranuras de los extremos de menor longitud, que crean empalmes desfasados, y de este modo se alternan las piezas y se produce transparencia.

## Pruebas experimentales

La siguiente fase consistió en estudios materiales, con tres finalidades: desarrollar posibilidades de diseño, comprobar configuraciones y revisar desempeños. El primer aspecto estaba destinado a complementar los desarrollos geométricos y modelaciones, debido a que algunas combinaciones y elaboraciones podían surgir a partir de la manipulación tridimensional real, antes que predecirlas teóricamente. En el segundo aspecto se requería verificar las dimensiones logradas por las distintas ordenaciones de piezas, por cuanto las ranuras y rotaciones podrían tener alguna variación en las conformaciones físicas. El tercer aspecto pretendía evaluar comportamientos lumínicos, estructurales y constructivos de las configuraciones.

Así, se elaboraron en una cortadora láser decenas de piezas de diferentes diseños a escala 1:5 con placas de madera de 3 mm. Se ejecutaron algunas configuraciones estimadas o se elaboraron nuevas posibilidades, efectuando mediciones, pruebas y tomas fotográficas; a la vez que se elaboraban diferentes condiciones de trabajo.

En relación con los aspectos de diseño, aunque las posibilidades de trazados geométricos y modelos digitales son más rápidas y extensas, probar directamente algunas ordenaciones permitió comprender más las configuraciones. Se elaboraron posibilidades similares a las previstas, normalmente en menores cantidades de piezas, pero se logró obtener y conocer su conformación detallada; sobre todo respecto a sus disposiciones en diferentes sentidos.

Por otro lado, se midieron las configuraciones elaboradas a escala, en diferentes ordenaciones y tipos de piezas, donde se encontraron diferencias dimensionales respecto a los diseños geométricos. Por ejemplo, se advirtieron mayores inclinaciones de las piezas, que producían radios de curvatura más estrechos (aproximadamente 10%) que lo planificado. También se revisaron los procesos de montaje, atendiendo la necesaria ordenación de los tipos de piezas, planificación general, secuencias de ensamble y ajustes finales.

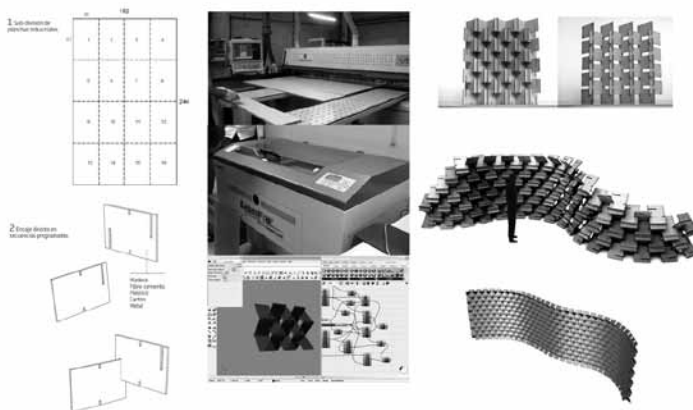


Figura 1. Composición inicial del muro-pixel

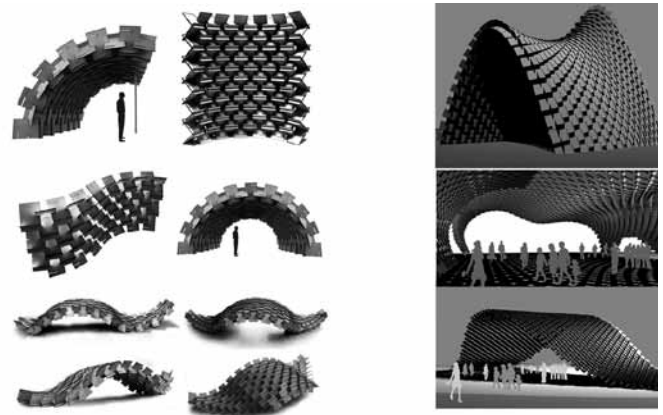


Figura 2. Configuraciones arquitectónicas (maquetas y modelos digitales)

## cobertura de emergencia

montaje de 15 m<sup>2</sup> con dos operarios en tres horas, utilizando 200 piezas (aprox. US\$ 350 total)

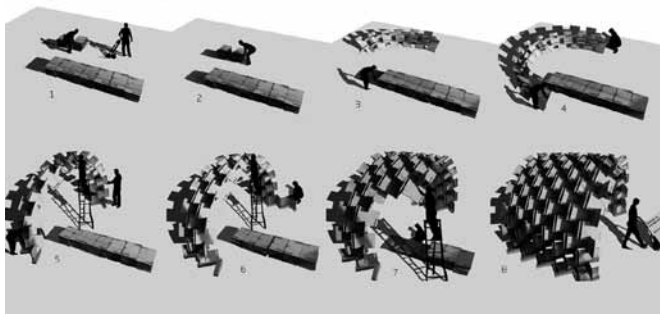


Figura 3. Montaje de cobertura básica con uro-pixel



Figura 4. Prototipo montado en U del Bío-Bío (paramento y arcos)

Respecto a las pruebas físicas, se efectuaron tomas fotográficas con iluminación frontal y posterior de configuraciones rectas y curvas, que permitieron percibir el desempeño lumínico de las diferentes piezas. Se realizaron algunas pruebas de deformación horizontal con cargas y de volcamiento vertical con elementos pendulares. Sin embargo, estas pruebas no son precisas, ni proyectables por las diferencias de tamaño y por la ausencia de sujeciones; pero permitieron conocer algunos desempeños comparativos de las configuraciones.

Finalmente se elaboraron modelos completos de los diseños finales probables, revisando diferentes aspectos de configuración y espacialidad, ejecución, iluminación y desempeño estructural y se efectuaron prototipos tamaño natural en diferentes recintos con el fin de experimentar y difundir este desarrollo tecnológico. Estos prototipos fueron realizados con el apoyo de diferentes industrias tanto para provisión de los materiales como para realizar corte en mayor escala con máquinas CNC.

Los prototipos realizados han demostrado una capacidad de diseño variable y elaboración automatizada que logra reducidos tiempos de ejecución. Esto configura paramentos extensos con bajo costo de materiales, rapidez de montaje, facilidad de modificación, capacidad autosoportante, propiedades de ventilación, transparencia y funcionalidad diversa, aunque los materiales más apropiados para manufacturar digitalmente no poseen terminaciones que aseguren su mantención prolongada al aire libre (especialmente en los cantos) y la configuración posee un espesor volumétrico significativo, así como una disposición condicionada para la apropiación funcional de sus piezas; además que el ensamble impide una adecuada impermeabilización. Estas condiciones determinan sus alcances vigentes y requieren experimentar algunas modificaciones; sin embargo, sus atributos logrados a la fecha sugieren un amplio campo de posibilidades de aplicación (figs. 1-4).

## Conclusiones

Esta experiencia revela un camino para desarrollar nuevos elementos y configuraciones basándose en capacidades tecnológicas, con un proceso iterativo entre la modelación computacional y la producción física. Los sistemas digitales de programación y fabricación acortan los ciclos de prueba entre el diseño y la ejecución, con lo cual se promueve la exploración de posibilidades innovadoras, pero debe ajustarse la relación entre las características de los componentes y sus aplicaciones potenciales para un adecuado desarrollo y así abrir nuevas estrategias de trabajo de diseño integrado en la formulación y ejecución de configuraciones arquitectónicas.

Este trabajo ha demostrado la ideación y desarrollo inicial de un sistema constructivo industrialmente eficaz, flexible, innovador y con bajo costo que se puede elaborar en distintos materiales y generar muchas configuraciones distintas con rápida ejecución, diseño paramétrico y manufactura digital con cortadora láser y CNC.

## Agradecimientos

Agradecemos la constante participación del estudiante de arquitectura de la Universidad del Bío-Bío, Óscar Otárola; a la ingeniera civil Karina Morales, y al profesor Patricio Cendoya. También a la empresa brasileña Armarius Design y a la empresa MASISA. Finalmente, al Fondecyt, proyecto 1100374.

## Referencias

- Ambrose, M., Callam, B., Kunkel, J. y Wilson, L. (2009, 22-25 de abril). *How to make a digi-brick*. Documento procedente del 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia/Yunlin (Taiwan), pp. 5-12.
- Bonswetch, T., Kobel, D., Gramazio, F. y Kohler, M. (2006). *The informed wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture, synthetic landscapes*. Documento procedente de la 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture, pp. 489-495.
- Botha, M. y Sass, L. (2006). The instant house: a model of design production with digital fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, 4 (4), 109-123.
- Caldas, L. y Duarte, J. (2005, 21-24 de septiembre). *Fabricating ceramic covers, digital design: the quest for new paradigms*. Documento procedente de la 23rd eCAADe Conference Proceedings, Lisbon, Portugal, pp. 269-276
- Gramazio, F. y Kohler, M. (2008). *Digital materiality in architecture*. Birkhauser: Lars Müller Publishers.
- Kieran, S. y Timberlake, J. (2004). *Refabricating architecture*. New York: McGraw-Hill.
- Menges, A. (2009, 22-25 de octubre). *Performative Wood: Integral computational design for timber constructions*. Documento procedente de la 29th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Chicago, Estados Unidos, pp. 66-74.
- Oesterle, S. (2009, 22-25 de octubre). *Cultural Performance in Robotic Timber Construction*. Documento procedente de la 29th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Chicago, Estados Unidos, pp. 194-200.
- Zisimopoulou, K. y Fragkiadakis A. (2006, 6-9 de septiembre). *Constructing the string wall: mapping the material process, communicating space(s)*. Documento procedente de la 24th eCAADe Conference Proceedings Volos, Greece, pp. 326-335.