

BIOMATERIALES Y TECNOLOGÍAS PARA UNA NUEVA ARQUITECTURA

Biomateriales y tecnologías para una nueva arquitectura

Fecha Recepción: 19 mayo 2017

Biobased materials and technologies for a new architecture

Fecha Aceptación: 5 julio 2017

PALABRAS CLAVE

Biomateriales | entramado ligero | madera contralaminada | madera laminada encolada | almacenamiento de carbono

KEYWORDS*Biobased materials | Platform-frame | Cross laminated timber | Glulam | Carbon storage*

Pierre Blanchet

Université Laval**Quebec, Canadá****Pierre.Blanchet@sbf.ulaval.ca**

Resumen_

Los proyectos de construcción de gran altura en madera se multiplican a un ritmo importante en todo el planeta. Entre los proyectos en marcha y los que se encuentran en proceso de concepción, encontramos distintos tipos de edificios. Actualmente existe una especie de carrera entre los países por construir el proyecto más innovador en madera. Este artículo propone una revisión de las soluciones de construcción disponibles, pero también de las soluciones del futuro para la construcción con madera.

Abstract_

High-rise timber construction projects multiply at a fast rate all over the planet. Among projects in progress and those in the process of conception, we can find different types of buildings. Nowadays countries seem to be racing to build the most innovative timber project. This article suggests a review of the construction solutions available, but also of the future solutions for timber construction.

Figura 6: Ejemplo de concepción de una malla estructural de madera.
Fotografía: Philippe Charest.

Figure 6: Example of conception of a structural wooden net. Photograph:
Philippe Charest.

EL ENTRAMADO LIGERO

Comencemos por debatir acerca de un sistema constructivo propio de Norteamérica, el sistema de entramado ligero. Se emplea extensamente en la construcción de viviendas unifamiliares y multifamiliares. En Canadá está permitido su uso para construcciones que llegan a seis pisos de altura. Buena parte de su éxito reside en que los códigos de construcción vigentes en Canadá y los Estados Unidos proponen una serie de soluciones preceptivas que permiten que cualquier persona con habilidades manuales y conocimientos de carpintería y albañilería esté capacitada para construir por sí misma su proyecto sin que sea necesaria, por ejemplo, la intervención de un ingeniero de estructuras.

El desarrollo de un proceso de construcción prefabricada en entramado ligero ha permitido la erección de edificios unifamiliares de 200 m² en menos de tres días. El sistema es tan popular en Canadá que representa el procedimiento más utilizado en el país para construcciones residenciales (casas unifamiliares y multifamiliares de algunas unidades) con una tasa de adopción del 90%. Además de su velocidad de erección, si lo pensamos, se trata de un sistema muy optimizado. Sus entramados de madera y sus plataformas utilizan muy poca materia prima al tiempo que generan edificios de gran volumen.

El sistema de entramado ligero está también documentado por su resiliencia en caso de sismo gracias a la ductilidad que ofrecen las uniones clavadas entre elementos estructurales. Cuando la envolvente se instala en forma adecuada, propone una gran eficiencia energética. Sin embargo, la gran optimización de materiales del sistema tiene como efecto una baja masa térmica. Observaciones sobre edificios gemelos, uno en entramado ligero y el otro con tableros de madera contralaminada (CLT por sus siglas en inglés) han dado como resultado que el consumo energético de uno con respecto al otro no fuera significativamente más elevado ni en condiciones de verano ni de invierno (Ramallo-González, Gosselin, Blanchet, & Natarajan, 2017).

El sistema de entramado ligero es tan común en Norteamérica que a menudo se deja de lado en la

construcción de edificios no residenciales. Sin embargo, también es posible emplearlo en dicho contexto, tal como lo hizo la firma canadiense STGM para su propio estudio (Figura 1). Al inspirarse en el sistema de entramado ligero, concibieron un ingenioso sistema de viguetas trianguladas visibles que tiene una doble función, tanto estructural como estética en el interior del edificio.

Hay que comprender que las viguetas son un producto en la ingeniería de la madera que supone un elemento clave en el sistema de entramado ligero, permitiendo crear cajones estructurales y, al mismo tiempo, compartimentos que limitan la propagación de las llamas en caso de incendio. Los productos tecnológicos de la segunda transformación de la madera tienen propiedades conocidas, de modo que al seguir las recomendaciones de los códigos de construcción, podemos ajustar sus dimensiones de manera fiable para cumplir los requerimientos de seguridad en cada circunstancia. Pero a pesar de la popularidad del sistema de entramado ligero, no es posible entrever un desarrollo de construcciones de altura con dicho sistema.

Los elementos que han conseguido que emerja la construcción en altura en madera son el aspecto natural de dicho material y la voluntad de los arquitectos de llevar a cabo proyectos con el mínimo impacto medioambiental. A los desarrolladores de materiales les gusta pensar que es la disponibilidad de un material respecto de otro lo que ha dinamizado la construcción de edificios de gran altura en madera, pero es más bien la voluntad del prescriptor. Gosselin et al. (2017) demostraron que la principal motivación de los arquitectos para la utilización de la madera en construcción no residencial y plurifamiliar es su valor medioambiental para el proyecto. El diagrama 1 muestra las conclusiones de Gosselin et al. (2017) acerca del estudio de 13 proyectos internacionales llevados a cabo durante la última década.

Este contexto medioambiental ha favorecido un mayor empleo de grandes elementos como la madera laminada encolada y los tableros CLT.

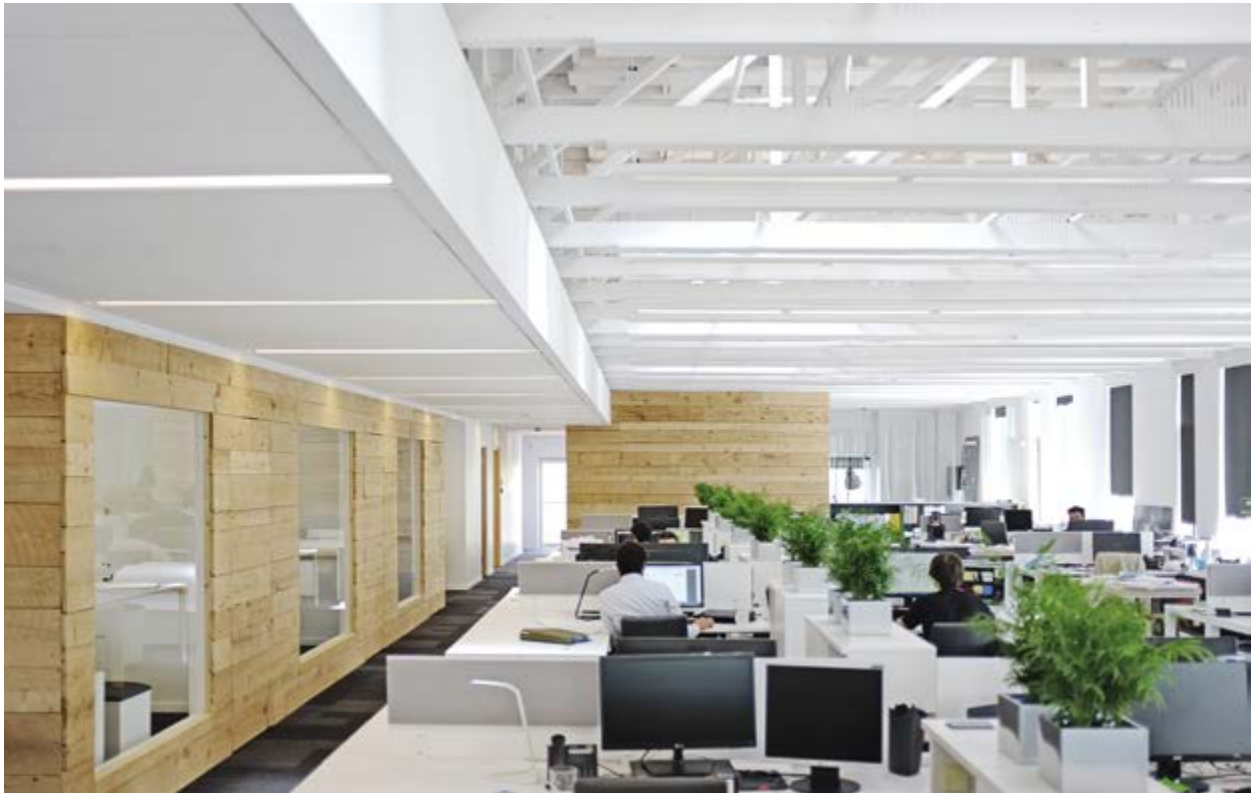


Figura 1: Estudio de arquitectura de la firma canadiense STGM en Quebec (2015). Se aprecia una utilización original de la estructura ligera una vez puesta en uso. Fotografía: Alexandre Guérin.
 Figure 1: Architectural study of the Canadian firm STGM in Quebec (2015). An original use of the light structure can be appreciated once it has been in use. Photograph: Alexandre Guérin.

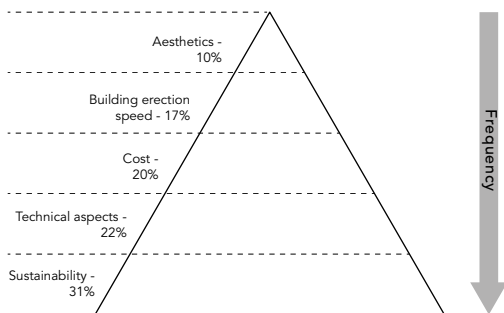


Diagrama 1: Motivaciones para la adopción de la madera como material estructural para edificios no residenciales en una serie de proyectos en altura durante la pasada década. La pirámide muestra la proporción de arquitectos para los que uno de los conceptos mostrados fue la primera motivación. Fuente: Gosselin et al., 2017.
 Diagram 1: Motivations for the adoption of wood as a structural material for non-residential buildings in a series of high-rise projects in the last decade. The pyramid shows the proportion of architects for whom one of the concepts shown was the first motivation. Source: Gosselin et al., 2017.



Figura 2: La impresionante estructura de madera laminada encolada de la Ciudad del Vino en Burdeos, diseñada por X-TU, propone superficies curvas fáciles de obtener con dicho material. Una laca traslúcida blanca fue empleada para dulcificar la presencia de la madera pero manteniendo el calor del material. Las conexiones se pensaron para reducir su presencia al mínimo y así mantener la limpieza formal del edificio, terminado en 2016. Fotografía: Pierre Blanchet.

Figure 2: The impressive glulam structure of the Cité du Vin in Bordeaux, designed by X-TU, proposes curves easy to be obtained with this material. A white translucent lacquer was used to lighten the presence of wood but maintaining the warmth of the material. The connexions were thought to reduce its presence to the minimum and so keep the formal cleanliness of the building, completed in 2016. Photograph: Pierre Blanchet.

LA MADERA LAMINADA ENCOLADA

La madera laminada encolada se emplea desde hace varios decenios en diferentes proyectos de envergadura. Sin embargo, el aumento del interés de los arquitectos en la madera ha favorecido que se incremente su utilización. Si bien su empleo en su versión más simple tiende a generar tipologías edificatorias ortogonales, también se ha empleado en formatos más abiertos. Por ejemplo, el estudio de arquitectura francés X-TU ha diseñado en Burdeos, Francia, un lugar de exposición llamado la Ciudad del Vino. En dicho proyecto se favoreció el empleo de la madera laminada encolada como estructura debido a una preocupación acerca de la complejidad y también por un interés estético (Figura 2).

La complejidad de este edificio demuestra el potencial de este material para proyectos de envergadura. Sin embargo, los conectores metálicos empleados en las estructuras de madera laminada encolada siguen siendo su punto débil, tanto desde el punto de vista de la seguridad estructural por la pérdida de continuidad que suponen como en lo concerniente a la seguridad en caso de incendio. Además, los conectores metálicos no terminan de integrarse debidamente a algunos conceptos arquitectónicos. Existe, por tanto, la necesidad de desarrollar conectores invisibles como, por ejemplo, las clavijas encoladas que permiten conexiones completamente ocultas. En este último caso, las clavijas metálicas y el adhesivo quedan protegidos por la propia madera en caso de incendio. Sin embargo, el comportamiento a largo plazo de este tipo de conectores debe documentarse, particularmente si la inspección de la ejecución de dichas uniones está limitada debido a la configuración de las conexiones. Tanto por razones estéticas como por seguridad en caso de incendio, es frecuente insertar las placas metálicas dentro de la madera, donde quedan ocultas y protegidas del fuego.

Los grandes proyectos de construcción que emplean la madera laminada encolada implican una mecanización de gran precisión de los elementos estructurales. Frecuentemente esta mecanización se realiza en fábricas empleando maquinaria de control numérico (CNC). Ello nos lleva a la siguiente pregunta: ¿aceptarían las

agencias de normalización la reintroducción de uniones madera-madera tal como han sido empleadas tanto en los templos japoneses como en las viejas construcciones europeas? Las máquinas de control numérico podrían, sin duda, convertirse en una herramienta de primer orden para la realización de semejantes ensamblajes complejos en las construcciones de gran altura. Por tanto, es legítimo preguntarse si esta tecnología es utilizada hoy en todo su potencial en las construcciones en madera. El potencial de fabricación de conceptos arquitectónicos complejos gracias a la prefabricación es inmenso. He aquí una pista para sacar a la madera de la limitación que imponen las formas ortogonales.

En términos de material, los tableros de madera contralaminada (CLT) han contribuido en gran medida al surgimiento de la construcción de gran altura en madera. Los arquitectos han elegido este material por sus propiedades técnicas, pero sobre todo por su baja energía intrínseca (comparada con la del hormigón armado y la del acero) y su capacidad de almacenar carbono biogénico, a razón de 1,1 toneladas de CO₂ por metro cúbico de madera (Frühwald, 2007). Los tableros CLT ofrecen además toda una serie de ventajas para su empleo en una construcción en madera, especialmente su ligereza, que ofrece la posibilidad de construir en altura sobre suelos con propiedades geológicas limitadas. Un ejemplo notable es la *Bridport House*, diseñado por la oficina Karakusevic Carson Architects y terminada en 2011. Se trata de un complejo de ocho plantas construido con tableros CLT encima de la principal canalización de aguas pluviales de Londres.

La rapidez en la ejecución de las obras también es una ventaja de las construcciones en madera. En varios proyectos se ha demostrado la posibilidad de construir una planta por semana cuando este se ejecuta con tableros CLT. Este fue el caso del edificio *Forté* construido en 2013 en Australia, y más recientemente la construcción del edificio *Brock Commons* en Vancouver, Canadá. Por último, el proyecto *Origine*, construido en Québec, Canadá, también demostró la mencionada velocidad de construcción, al tiempo que ponía en evidencia otros elementos de seguridad de las construcciones con CLT.



Figura 3: El proyecto *Origine* (Nordic Structures, Quebec, en construcción) propone una torre de viviendas de 13 plantas. Mientras una planta de hormigón armado sirve de cimiento, las doce plantas superiores están totalmente construidas con tableros CLT. En el detalle se aprecia un tablero CLT especialmente concebido para conformar la caja del ascensor y recibir las cargas laterales. El sistema de cerramiento realizado con tableros CLT propone paneles que cubren la cara de tres plantas. Llaves de cortante de acero han sido utilizadas para asegurar la transferencia de cargas de un panel a otro. El cerramiento exterior es simple: revestimiento exterior, piel metálica, aislamiento en paneles de fibra, membrana de estanqueidad adherente y CLT. Fotografía: Nordic Structures.

Figure 3: The Origine project (Nordic Structures, Quebec, under construction) proposes a 13-storey residential tower with a reinforced concrete floor as the foundation; the 12 upper floors are completely made of CLT panels. A detail can be seen of a specially designed CLT panel to form the lift shaft and receive lateral loads. The closing system made of CLT proposes panels that cover three floors. Steel cutting tools have been used to ensure the transfer of loads from one panel to another. The exterior closing is simple: external covering, metal skin and insulation by fibre panels, adhesive water tight membrane and CLT. Photograph: Nordic Structures.



Figura 4: Fotografía del ensayo de comportamiento al fuego de la torre *Origine*.

Figure 4: Photograph of the fire behaviour test of the Origine tower.

En efecto, el proyecto *Origine*, diseñado por Nordic Structures (Figura 3), propone una construcción completamente ejecutada con tableros CLT, incluidas las cajas de escaleras y ascensores. Las autoridades reguladoras de la provincia de Quebec exigieron demostraciones técnicas antes de permitir dicha construcción. En lo concerniente a la seguridad en caso de incendio, se realizaron ensayos a escala 1:1. Se construyó un departamento en una planta adyacente a una caja de escaleras también construida con tableros CLT, sin ningún tipo de recubrimiento de propiedades retardadoras de la propagación de las llamas, como el cartón-yeso. La prueba consistió en encender artificialmente una carga de fuego normalizada en una sección del apartamento. El comportamiento indicó que la resistencia al fuego era superior a dos horas y que la subida de la temperatura era prácticamente nula en la caja de escaleras adyacente. El ensayo se realizó en presencia de los bomberos de las principales ciudades del Este de Canadá: una buena manera de informar a las partes implicadas acerca de la seguridad en caso de incendio de las construcciones hechas con tableros CLT (Figura 4).

Aunque a menudo categorizamos los sistemas estructurales por su material principal, parece que cada vez más las construcciones aprovechan los diferentes materiales disponibles en sistemas híbridos. Es por tanto frecuente ver estructuras de pilar y viga con tableros CLT, tal y como sucede en los proyectos *Brock Commons* y *Origine*. El empleo de una caja técnica (ascensores, escaleras y servicios) es también frecuente. Generalmente esta última permite una concepción técnica más simple para resolver las cargas laterales (viento y sismo). Es asimismo frecuente ver estructuras con forjados mixtos madera-hormigón, como los que se emplearon en el proyecto *UMass Design Building*, terminado en 2016 en los Estados Unidos de Norteamérica. En dicho proyecto, los diseñadores —Leers Weinzapfel Associates— probaron hacer colaborar la madera con el hormigón para así obtener propiedades estructurales superiores a las que presenta cada material individualmente.

Este es un amplio campo de investigación y es razonable pensar que habrá desarrollos en lo concerniente a

las estructuras híbridas. Auclair et al. (2016) propusieron un conector económico de hormigón armado con fibra de muy alta resistencia (BFUP) que permitía el control de la ductilidad en las estructuras compuestas madera-hormigón. La economía de dicho conector se debe a la posibilidad de prefabricación y a que limita el tiempo de intervención de los obreros en la obra, un recurso que puede ser importante tal y como se observó en el proyecto *UMass Design Building* (Figura 5).

En lo que concierne a la seguridad de los ocupantes, el diseñador se tranquilizará por la posibilidad de concebir y controlar el comportamiento final de la estructura. He aquí otro avance técnico que democratiza la utilización de la madera. En un futuro cercano se prevé el desarrollo de sistemas híbridos con otros tipos de materiales, tales como el acero y el aluminio. La industria de la construcción en madera debe, desde ya, asegurar su liderazgo proponiendo soluciones híbridas muy dirigidas a la prefabricación y que favorezcan la construcción rápida de conceptos arquitectónicos complejos.

En este sentido, hay un sistema estructural que ha sido descuidado. Se trata de las estructuras en malla (*grid shell*) (Figura 6). Son pocos los proyectos construidos con este concepto estructural. El último de esta lista es el pabellón de recepción de la destilería Macallan en Escocia (Rogers, Stirk, Harbour + Partners). Se produjo un vacío de quince años en la utilización del sistema para un proyecto de envergadura a nivel mundial (desde que se completara el *Weald and Downland Museum* en Inglaterra). El sistema permite una gran optimización de la relación material/volumen entre apoyos; sin embargo, la lentitud en la erección de dichas estructuras tiende a desanimar a los promotores. Para poder democratizarse, el sistema debe industrializarse y conseguir una puesta en obra más rápida.

El futuro de la construcción implica también la transformación de la madera, pasando de ser un material de ingeniería tradicional a ser un material moderno. Aquí, las posibilidades de desarrollo son inmensas. Pero, ¿cómo modernizar un material creado por la naturaleza? Hay diversas estrategias en desarrollo y estas irán



Figura 5: Proyecto *UMass Design Building* realizado con CLT (Nordic Structures, Amherst, EE.UU., 2017). Se pueden ver los conectores HBV que favorecen la colaboración entre los tableros CLT y el hormigón armado (se trata de una solución costosa debido a la necesidad de emplear resinas). Fotografía: Nordic Structures.

Figure 5: Project *UMass Design Building* built with CLT (Nordic Structures, Amherst, USA, 2017). HBC connectors can be seen that favour the collaboration between the CLT panels and the concrete (it is an expensive solution because of the need to use resins). Photograph: Nordic Structures.

umentando para adaptarse a los desafíos propuestos por los arquitectos. Se pueden realizar algunas modificaciones en la materia, como la modificación química de la estructura de la madera (a escala celular) o modificaciones termo-higro-mecánicas. También existe la posibilidad de inyectar materiales sintéticos en la masa de la madera para darle propiedades que de otra manera no tendría. Más sencillamente, se puede recurrir a la aplicación de revestimientos funcionales en su superficie, o incluso a la disposición de materiales sucesivos que permitirían alcanzar los más altos estándares en la construcción.

¿Qué pueden permitir los materiales avanzados en la construcción en madera? Lafond et al. (2016) lo demuestran a través de un ejemplo. Una inyección de una pequeña cantidad de polímero en el hueco de una unión atornillada permitió aumentar la capacidad portante de los bulones, reducir la sección del elemento estructural, generar una mejor distribución de los esfuerzos en el interior de la madera y disminuir la variabilidad observada en la capacidad mecánica de los conectores (Diagrama 2).

La estabilidad dimensional de la madera es un problema que podría ser objeto de avanzadas investigaciones en materiales. Entre los enfoques más prometedores está la acetilación de la madera y la impregnación con éster de glicerol-ácido cítrico. Los beneficios de estos tratamientos sirven particularmente para los usos de la madera al exterior, como son los revestimientos de fachada, pero también para aquellos elementos estructurales que suponen una continuidad entre el exterior y el interior de un edificio.

La impregnación de materiales funcionales encapsulados en la masa de la madera podría, en breve, permitir el aumento de la masa térmica de la madera gracias al empleo de materiales con cambio de fase. Igualmente, la impregnación de materiales funcionales permitiría proteger la madera de los rayos ultravioleta (gracias a cápsulas sensibles a la energía solar), proteger la madera respecto a la propagación de las llamas (gracias a cápsulas termo sensibles retardantes de las llamas) o favorecer

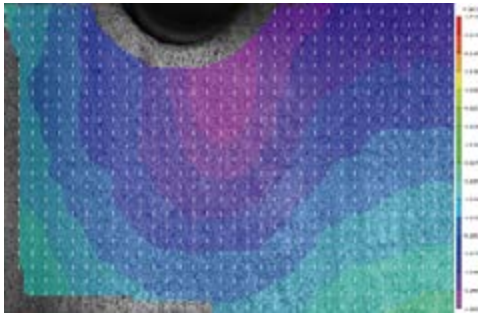
la absorción o la reflexión de rayos infrarrojos según la temperatura del entorno (gracias al empleo de materiales termocrómicos, tales como el dióxido de vanadio). Existen pocos límites a las nuevas funciones que se pueden integrar en los materiales basados en la madera, siempre que las ventajas finales justifiquen los esfuerzos de producción que requiere su integración.

CONCLUSIÓN

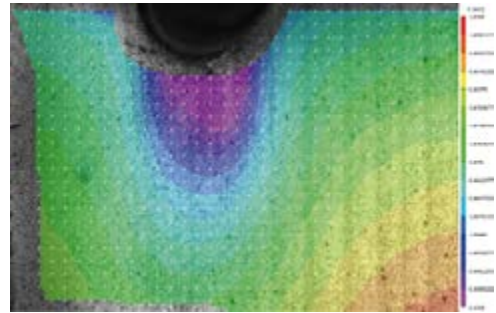
Para poder evolucionar, la construcción en madera necesitará un buen número de desarrollos técnicos. Algunos de ellos están directamente ligados al estudio de los entramados de madera (*timber engineering*), particularmente todos los desarrollos asociados al montaje de estructuras y las uniones. Estas deben evolucionar hacia soluciones más estéticas y ofrecer opciones arquitectónicas más variadas. Debe llegarse más allá de los conectores metálicos atornillados o clavados y una opción es ofrecer uniones ocultas gracias a clavijas encoladas o mediante uniones madera-madera.

Pero la construcción en madera debe presentar además ventajas en el propio sistema. Si la rapidez de montaje de los edificios es la ventaja número uno para el constructor, el diseñador apreciará la posibilidad de personalización. El acero ofrece pocas posibilidades de personalización. El hormigón armado, por su parte, permite cierta personalización, pero esta se ve limitada por las posibilidades que ofrecen los encofrados. La madera, gracias a su facilidad de mecanizado, se debería posicionar como el campeón de la personalización. Los elementos estructurales redondos, excéntricos o curvos deberían ser la punta de lanza de los grandes proyectos innovadores.

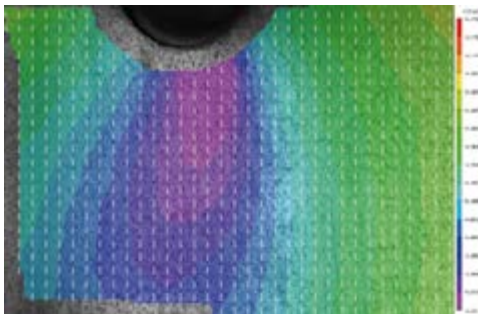
De todos modos, es importante que los arquitectos mantengan el rumbo en el empleo de la madera para construcciones de gran altura, particularmente en proyectos de gran visibilidad. Aunque estos representan una parte limitada de toda la construcción posible con madera, los proyectos más visibles son una vitrina para las soluciones técnicas. La mayor riqueza de estos proyectos, desde el punto de vista de la elaboración de soluciones constructivas repetibles en los proyectos convencionales, es que



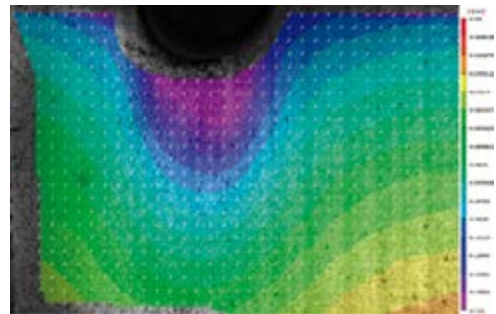
Untreated -15 MPa



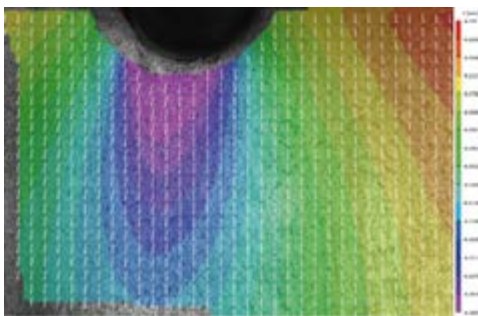
Treated -15 MPa



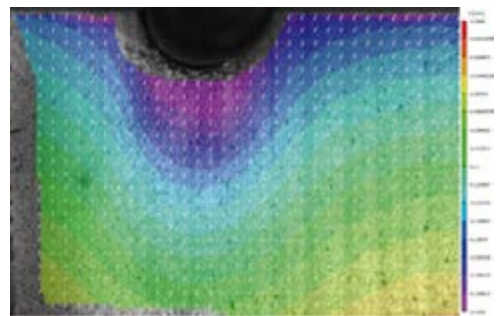
Untreated -25 MPa



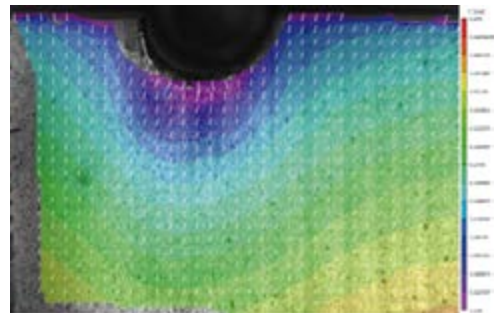
Treated -25 MPa



Untreated -32 MPa



Treated -35 MPa




Treated -46 MPa

Diagrama 2: Distribución de los esfuerzos en una unión atornillada tratada con polímero y en otra no tratada. Nótese que los esfuerzos están mejor distribuidos en la conexión tratada y que la carga aplicada fue también más elevada. Fuente: Lafond, Blanchet, Landry, Galimard, & Ménard, 2016.

Diagram 2: Distribution of efforts in screw joints, one treated and the other one not treated with polymer. It can be seen that efforts are better distributed in the treated connexion and that the load applied was also higher. Source: Lafond, Blanchet, Landry, Galimard, & Ménard, 2016.

fuerzan a los ingenieros y a los fabricantes de materiales a salir de sus paradigmas.

Por último, la demostración de las ventajas medioambientales, fuerza motriz en la selección de la madera por parte de los arquitectos, debe continuar documentándose con el fin de posicionar, fuera de toda duda, a los sistemas constructivos basados en la madera como campeones en la lucha contra el cambio climático. Además, no debemos olvidar los ambientes físicos creados por el material madera. Estos son beneficios a largo plazo para los ocupantes y aseguran calidad en la iluminación, calor en los espacios y un sentimiento de confort. Para los espacios de trabajo, estas cualidades pueden significar una mayor productividad y una reducción en el absentismo. Las ventajas de la construcción en madera son, por tanto, múltiples, amplias y complejas. Incumbe a la comunidad científica alimentar la reflexión de los arquitectos e ingenieros, quienes tienen un rol clave en la realización de los grandes proyectos de construcción en madera. 

REFERENCIAS

- AUCLAIR, S. C., SORELLI, L., & SALENIKOVICH, A. (2016). A new composite connector for timber-concrete composite structures. *Construction and Building Materials*, 112, 84-92.
- FRÜHWALD, A. (2007). *The Ecology of Timber Utilization Life Cycle Assessment Carbon Management*, etc. Probos Foundation. Kick off meeting CSR (Doorn, 15 de noviembre, 2007).
- GOSELIN, A., BLANCHET, P., LEHOUX, N., & CIMON, Y. (2017). Main Motivations and Barriers for Using Wood in Multi-Story and Non-Residential Construction Projects. *BioResources*, 12(1), 546-570.
- LAFOND, C., BLANCHET, P., LANDRY, V., GALIMARD, P., & MÉNARD, S. (2016). Effect of acrylate wood impregnation on mechanical properties of wood structure connector's zone. *BioResources*, 11(1), 1753-1764.
- RAMALLO-GONZÁLEZ, A., GOSELIN, L., BLANCHET, P., & NATARAJAN, S. (2017). Stochastic non-adaptive occupant behavior models in dwellings: Review and development of a unified tool. Submitted to *Applied Energy* (APEN-D-17-04115).