

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIGROMÓRFICO DE UN DOBLE CAPA EN MADERA BAJO LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

CHARACTERIZATION OF THE HIGROMORPHIC PERFORMANCE OF A WOOD BYLAYER COMPOSITE UNDER THE WEATHER CHARACTERISTICS OF BOGOTA CITY

Pérez Cabrera, David Sebastian ⁽¹⁾*; Lozano Peña, Jorge Enrique ⁽²⁾

⁽¹⁾ Arq. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽²⁾ MSc Arq. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

* Contacto: dsperczc@unal.edu.co

Resumen

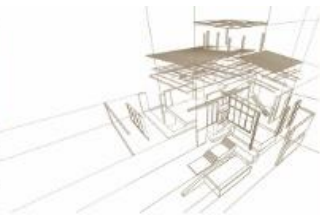
Los materiales tienen propiedades físico mecánicas intrínsecas a su naturaleza que siempre se han considerado positivas o negativas según sus usos. En cuanto a aplicaciones estructurales en la construcción, la madera tiene grandes variaciones dimensionales ante la humedad lo que puede generar esfuerzos internos en las estructuras, lo que se considera una desventaja en este ámbito. Este cambio dimensional ante la humedad se denomina comportamiento higromórfico: estudiarlo en los materiales abre la posibilidad de su implementación en situaciones que exploten la respuesta pasiva como herramienta que reacciona al ambiente circundante. En base a la capacidad de los subsistemas naturales de adaptar su forma a las condiciones ambientales cambiantes con fines funcionales como las que presentan las piñas de pino abriéndose o cerrándose para liberar sus semillas ante el cambio de la humedad, se han desarrollado investigaciones que emulan este comportamiento con materiales compuestos, tales como bicapas con componentes de madera, textiles o polímeros. Esta investigación caracteriza el comportamiento higromórfico de un bicapa en madera que responde de manera pasiva a la humedad del ambiente de Bogotá con deformaciones programadas. Para tal fin se fabricaron varias probetas compuestas de madera de especies naturales disponibles comercialmente, con una interfase de adhesivo; posteriormente fueron sometidas a condiciones de humedad controlada en laboratorio, y se reportó su deformación con base a la curvatura radial generada, la velocidad de respuesta de la deformación y su uniformidad, delaminación y la recuperación de la condición inicial.

Palabras-clave: materiales responsivos, compuesto dos capas, expansión higromórfica de madera, biomimesis

Abstract

The materials physical-mechanical properties have always been considered positive or negative according to their most widespread uses. In structural applications, wood has large dimensional variations due to moisture changes which can generate internal stress in the structures, is considered a disadvantage in this area. This dimensional change before humidity is called hygromorphic performance: studying it in materials opens the possibility of its implementation in situations that exploit the passive response as a tool that reacts to the surrounding environment. Based on the ability of natural subsystems to adapt their shape to changing environmental conditions for functional purposes, such as those presented by pine cones opening or closing to release their seeds in the presence of moisture changes, some investigations emulate this performance with composite materials, such as bilayers with wood, textile or polymer components. This research characterizes the hygromorphic performance of a wood bilayer that responds passively to the humidity of Bogota's environment with programmed deformations. For this purpose, several test pieces composed of commercially available wood species, with an adhesive interface were prepared. Subsequently, they were subjected to controlled humidity conditions in the laboratory, and their deformations were reported based on the radial curvature generated, the speed of response to the deformation and its uniformity, delamination and recovery to initial conditions.

Keywords: responsive materials, bilayer composites, wood hygroexpansion, biomimicry



1. INTRODUCCIÓN

Se puede observar la capacidad de subsistemas naturales de adaptar su forma a las condiciones ambientales cambiantes con fines funcionales, como las que presentan las piñas de pinos como el *Pinus coulteri*, que al caer y ser expuestas a un estímulo de humedad alta se abren para liberar sus semillas en un ambiente favorable para su germinación. Con base a este comportamiento de cambio de la forma y dimensiones frente al estímulo de cambio de la humedad (Comportamiento higromórfico) se han desarrollado investigaciones enfocadas a la arquitectura responsiva, emulan este fenómeno con materiales compuestos, tales como bicapas con componentes de madera, textiles o polímeros, con el fin de abrir la posibilidad de aplicación funcional y estética de estos en el diseño y construcción.

Esta investigación caracterizó el comportamiento higromórfico de un bicapa en madera que responde de manera pasiva a la humedad del ambiente con deformaciones programadas bajo las variaciones de humedad relativa encontradas en la ciudad de Bogotá. Para tal fin se fabricaron probetas compuestas de especies de madera natural disponibles comercialmente como componente activo y pasivo con una interfase de adhesivo, estas fueron expuestas a condiciones de humedad controlada, y se describió su deformación con base a la curvatura circular obtenida, la velocidad de respuesta de la deformación, la uniformidad de esta, la presencia de delaminación y la recuperación de la condición inicial.

2. ARQUITECTURA RESPONSIVA

La capacidad de movimiento o cambio en la arquitectura es un tema que se ha tratado desde varias perspectivas estéticas y funcionales, Meager de la Universidad de Sheffield en su artículo publicado en el 2015 plantea un acercamiento desde las posibilidades estéticas, y como los componentes responsivos que hacen parte de la edificación cumplen un papel tanto funcional como estético, definiéndolos como todos aquellos elementos de una edificación que se adaptan tanto a las necesidades de los habitantes como a los cambios del ambiente [1].

En cuanto a concepto interacción entre el entorno y el objeto arquitectónico es estudiada por Sterk en su artículo publicado en 2005 desde la alternativa de concebirlo como una sistema que aprende y responde a la información que recibe basado en el concepto de Negroponte, aunque Negroponte plantea este problema desde la perspectiva de mejorar el proceso de diseño de las edificaciones [2], los avances técnicos y tecnológicos de los ejemplos ya ilustrados han permitido que estas respondan en tiempo real al cambio de la situación circundante, a esta arquitectura Sterk la define como arquitectura responsiva “un tipo de arquitectura que tiene la habilidad de alterar su forma en respuesta a condiciones cambiantes” [3].

De una manera similar Philip Beesley y Omar Khan en una publicación de la Liga de Arquitectos de Nueva York publicado en 2016 se refieren a ella como “Una nueva generación de arquitectura que responde a los ocupantes de las edificaciones y los factores ambientales que ha abrazado los sistemas técnicos distribuidos como un medio y fin para desarrollar relaciones más enriquecedoras entre las personas, el espacio que



habitan y el medio ambiente.” [4]. La discusión de estos autores se decanta en como los sistemas técnicos y de información tienen el potencial de modificar profundamente la interacción del habitante con el objeto arquitectónico más allá de los beneficios funcionales que ofrece este acercamiento al diseño.

Con base a estos acercamientos al tema podemos clasificar desde dos perspectivas: A que se responde o cual es la fuente del estímulo que acciona el comportamiento responsivo; y como se responde o cual es la manera en que el sistema responde al estímulo. Dentro de la primera podemos decir en arquitectura responsiva se responde a dos fuentes de estímulos: el usuario y a estímulos externos o ambientales; en la segunda clasificación podemos decir que hay respuestas activas ya sean activadas por el usuario o por sistemas automáticos, y pasivas donde el mismo subsistema genera respuestas a los estímulos.

Tabla 65: Clasificaciones en Arquitectura Responsiva

A qué se responde	Al usuario	Necesidades funcionales
		Necesidades de confort
	Estímulos externos/ ambientales	Fuerzas externas
		Temperatura
		Asoleamiento
Cómo se responde	De manera activa	Humedad
		Respuesta activada por el usuario
	De manera pasiva	Respuesta activada por sistemas automáticos
Respuesta desde el subsistema		

3. BICAPAS RESPONSIVOS ANTE LA HUMEDAD

Con base al análisis del fenómeno de dispersión de semillas de las piñas de pino (*Picea abies*), Reyssat y Mahadeban de la universidad de Harvard en su investigación publicada en el 2009, encuentran que este comportamiento se debe a la estructura de dos capas localizada en la base de las escamas de las piñas, que ante la presencia de un ambiente húmedo reacciona con la apertura de las mismas, debido a la diferencia entre los coeficientes de higr expansión de los tejidos que las componen generando esfuerzos internos que provocan la curvatura de las mismas, este comportamiento se reproduce de manera repetida y reversible según la exposición a ambientes secos o húmedos (ver figura 2).

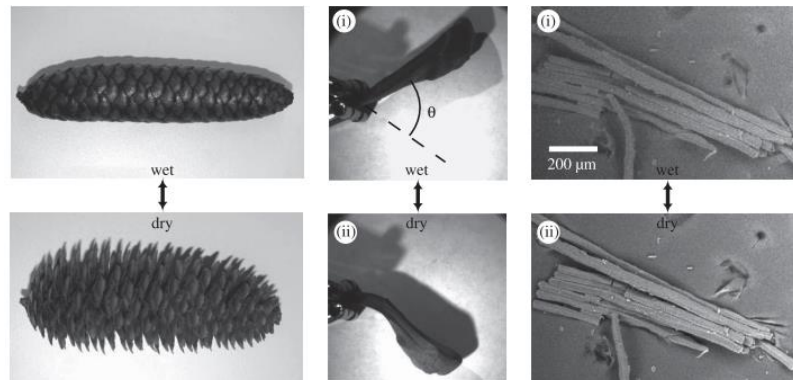
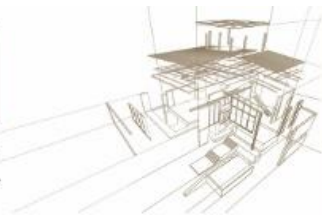


Figura 1: Comportamiento higromórfico de las piñas de pino a nivel de órgano, tejido y celular. Fuente: *Hygromorph: from pine cone to biomimetic bilayers* [5]

Con base a esta observación adaptan la teoría de termostatos bimetálicos de Timoshenko[6] remplazando la temperatura por la humedad para describir el comportamiento higromórfico de materiales de dos capas. Para la comprobación de estas dinámicas se fabricó un prototipo de material higromórfico de dos capas de papel y plástico: al sumergir uno de los extremos en agua el papel la transportó por capilaridad y generó una deformación similar a la encontrada en las piñas de pino. Posteriormente en 2015, Holstov en la Universidad de Newcastle en Reino Unido publica una investigación donde desarrolla un bicapa en madera e ilustra algunos ejemplos aplicación históricos y prototipos actuales. El interés de utilizar madera como componente de este material se debe a razones tanto ambientales como funcionales, como se expuso anteriormente las características responsivas de varios materiales pueden ser explotadas para lograr el mismo comportamiento, pero el impacto ambiental de los métodos de fabricación y el material mismo pueden reducirse notablemente al utilizar la madera como material principal [7]. Durante la investigación se resalta el hecho de que el comportamiento físico-mecánico de las láminas de madera está fuertemente influenciado por la dirección de las fibras y su relación con el tipo de corte con el que fueron extraídas las láminas (chapillas) del tronco del tronco debido a los coeficientes de higroexpansión, y por subsiguiente las deformaciones presentadas al exponerse ante la humedad. Para verificar el comportamiento del material se fabricó un prototipo con madera y polímero reforzado con fibra de vidrio, se expone a ciclos de inmersión y secado y a cambios en la humedad relativa.

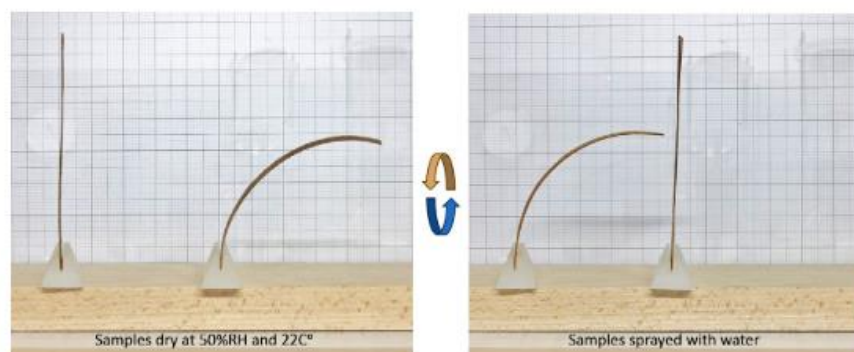
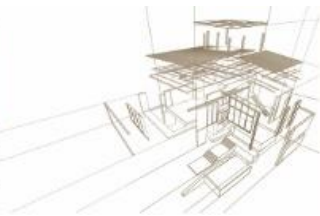


Figura 2: Respuesta de las muestras rociadas con agua. Fuente: *Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture* [11]



4. CONDICIONES DEL ESTUDIO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1. Propiedades relevantes para la selección del material

Como lo muestra Holstov en su investigación las propiedades que definen la aplicabilidad del material son: “la responsividad (la magnitud de los cambios de forma), la capacidad de reacción (el tiempo de respuesta), la capacidad de actuación (determinada por la fuerza producida como resultado de la respuesta), resistencia estructural (capacidad para soportar cargas aplicadas sin deflexión excesiva y daño irreversible), durabilidad (resistencia a la degradación), sostenibilidad (impacto ambiental, efectos en las personas y consideraciones económicas) y estética.”[7] Para caracterizar el comportamiento del material en el contexto local nos centraremos en la responsividad, la capacidad de reacción, y la integridad estructural.

Responsividad: Como ya lo expusieron Reyssat et al y Holztov et al la responsividad o magnitud de la deformación obtenida puede ser medida en la curvatura circular (inverso del radio de la curvatura). Esta deformación frente a los cambios de humedad depende de los coeficientes de higr expansión de las capas del material, el cambio de humedad efectivo del material, el grosor de las capas, los módulos de elasticidad de los componentes y el grosor total del material.

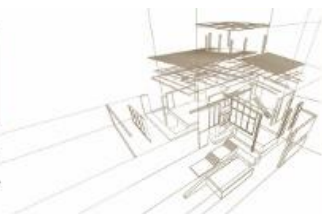
Capacidad de reacción: La capacidad de reacción se refiere al tiempo de respuesta del bi-capa, es decir cuánto tiempo toma al material cambiar su forma ante el estímulo de un cambio de humedad tanto en los ciclos de saturación como de secado, según las observaciones hechas por Reyssat el tiempo de respuesta depende del ancho de la capa activa y la permeabilidad de las capas utilizadas[5].

Integridad estructural: El material debe ser capaz de soportar las fuerzas internas generadas por el proceso de reacción, durante las pruebas exploratorias realizadas las fallas relacionadas con este aspecto que se presentaron fueron la delaminación y la reducción de la capacidad del material para recuperar su forma inicial. La delaminación es causada debido a la incapacidad de la interfase a soportar las fuerzas creadas por el diferencial de deformación de las capas, generando una separación entre las mismas (ver figura 5). La incapacidad para recuperar la condición inicial se debe a que las fuerzas generadas por la deformación inicial superan el rango elástico de la capa pasiva material y entra en su rango plástico, causando deformaciones permanentes en la capa y por consiguiente en el material.



Figura 3: Delaminación (izq.) e incapacidad para recuperar la condición inicial (der.)

4.2. Condiciones del estudio



El parámetro más importante para la selección de la chapilla natural fue la disponibilidad comercial, la presentación comercial debería tener al menos 12 cm de ancho para la elaboración de las probetas según el sentido de la fibra, y no debería presentar demasiados nudos y defectos. Se priorizó la búsqueda de chapillas de madera nacional, pero la única de fabricación nacional y con especies naturales encontrada comercialmente fue el Flormorado, se seleccionaron seis especies según estos parámetros: Haya (HA-*Fagus sp.*), Sapelli (SA-*Entandrophragma cylindricum*), Sycamore (SY-*Platanus occidentalis*), Flormorado (FM-*Tabebuia rosea*), Palisandro (PA-*Dalbergia sp.*) y Teca (TN-*Tectona grandis*).

Para los ensayos donde se evalúan los ciclos de humedad y secado se eleva la humedad al 90% en el equipo y se expone a la humedad ambiente durante los ciclos de secado.



Figura 4: Fabricación y prensado de las probetas

Para la fabricación de las probetas se usa adhesivo de contacto base solvente diseñado para chapilla (bondex K). Las láminas de chapilla son cortadas con dimensiones de 20mm x 100mm, posteriormente se aplica el producto de manera uniforme, se deja secar por 15 minutos, se unen las piezas y se prensan por 48 horas a temperatura y humedad ambiente.

4.3. Diseño experimental de la primera fase

La primera fase de ensayos se realiza como un acercamiento a las características y comportamiento del material, con el fin de seleccionar las combinaciones de especies y dirección de la fibra que presentan una mayor respuesta ante los cambios de humedad relativa. Además de descartar combinaciones que presenten delaminación, poca uniformidad de la deformación y no se recuperen de la deformación después de los ciclos de secado. Para este ensayo se fabrican 60 probetas con 15 combinaciones de especies y 4 combinaciones de la dirección de la fibra (transversal T y longitudinal L). Se realiza un montaje con un acrílico que tiene una retícula de 10mm x 10mm que servirá como escala gráfica para medir deformación de las probetas (ver figura 7).

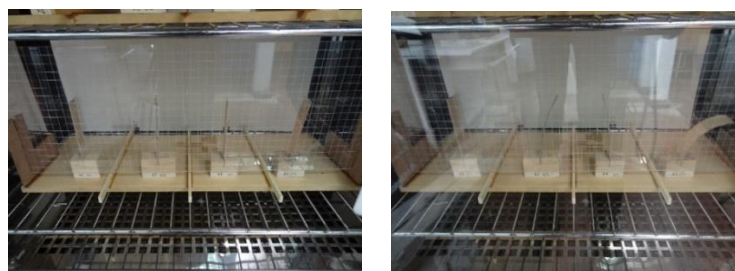


Figura 5: Muestras a las 0 horas y a las 24 horas de exposición



Las muestras se exponen a una humedad relativa de 90% por 24 horas en la cámara de humedad controlada. Donde se toman fotografías cada media hora por las primeras 6 horas y a las 24 horas para determinar la deformación presentada contra el tiempo de exposición.

Para clasificar la recuperación de las probetas en esta ronda de ensayos se determinó el uso de la siguiente escala para la medición de la recuperación del estado inicial: recuperación completa, deformación ligera (de menos de 5 mm), deformación pronunciada (de hasta 20 mm) y deformación muy pronunciada (más de 20 mm).

Después de consolidar y analizar los datos de las probetas, se seleccionan las 2 combinaciones de especies de madera y sentidos de la fibra que presentan un mejor desempeño bajo las variables determinadas en el numeral 1.3 (la mayor deformación dentro del menor tiempo, deformación uniforme, sin delaminación, y con una recuperación de la deformación clasificada como ligera o de menos de 5mm). Con las probetas seleccionadas se realizará el siguiente experimento de ciclos de humedad y secado.

4.4. Diseño experimental de la segunda fase

En este ensayo se busca recopilar información más detallada del material, al ser sometido ciclos de humedad alta y ciclos de humedad baja y de esta manera determinar el tiempo que le toma al material recuperar su forma inicial y en qué medida la recupera. Para tener una mayor trazabilidad del proceso de fabricación se toman datos de las condiciones de temperatura y humedad en el momento del ensamble. Además, se modifica el montaje para evitar la aparición de reflejos en las fotografías y se utiliza una cámara estática programada para realizar la captura cada 30 minutos, y minimizar la variación de las mediciones.



Figura 6: Ensayo de selección.

Para este ensayo se fabrican 6 probetas con 2 combinaciones de especies y de dirección de la fibra, seleccionadas en base a los datos obtenidos en el ensayo anterior. Este procedimiento se realizó a 53% HR y 19°C.

El procedimiento del ensayo consta de cuatro ciclos de 12 horas: Inicialmente se exponen las muestras a un ciclo de humedad alta (90% HR) en la cámara de humedad controlada por 12 horas; al terminar este ciclo se exponen a humedad ambiente por 12 horas; Al finalizar este ciclo se repiten el primero y el segundo ciclo. Durante todo el ensayo se toman fotografías cada media hora para medir la deformación presentada en relación con el tiempo de exposición al estímulo.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados de la primera fase

Después de someter a las 60 probetas a 90% de HR el resultado más evidente es que ninguna de las 15 combinaciones de probetas con sentido longitudinal de la fibra en las dos capas reacciono de manera significativa al estímulo. Esto se debe a que el sentido longitudinal de la fibra es el que presenta menores coeficientes de higr expansión, por lo tanto, no se genera una respuesta significativa ante el estímulo de la humedad. Igualmente se encuentra que las probetas alcanzan un 80% de su deformación máxima en las 3 primeras horas de exposición. Las 45 probetas restantes 25 (el 55%) no recuperaron su forma inicial después de ser sometidas a 24 horas de 90% de HR. Como se mencionó anteriormente este fenómeno se debe las fuerzas a las cuales se ve sometida la capa pasiva, estas superan su rango elástico y entran en su rango plástico, causando deformaciones permanentes en la capa y por consiguiente en el material. La delaminación se presentó en 9 de las 60 probetas, en 6 de esos casos una de las capas era de la especie Sapelli, que presenta la menor sección con 0.42mm. Y la deformación no uniforme se dio en 3 de los 60 casos, con capas de Palisandro, Flormorado y Teca. Con base a estos resultados se preseleccionan 22 probetas. Para la selección de las 2 combinaciones con mejor desempeño se descartan las probetas que presentan delaminación, no presentan deformación uniforme, y presentan deformaciones pronunciadas o muy pronunciadas después del ciclo inicial de humedad. Tras este proceso de selección donde fueron seleccionadas las FM+HA TT y FM+SI TT, cuyo comportamiento se explica por los coeficientes de higr expansión más altos del sentido transversal de la fibra como se puede observar en la figura 31. Como podemos ver en la figura 115 las probetas alcanzan un porcentaje considerable de su deformación total en las primeras 3 horas, la probeta FM+HA TT alcanza 17.58 m^{-1} (92.02%) de su deformación máxima (19.1062 m^{-1}) y la probeta FM+SY TT alcanza 10.70 m^{-1} (86.47%) de su deformación máxima (12.3835 m^{-1}), sin presencia de delaminación, con deformación uniforme y ligera después de estar expuestos a 90% HR.

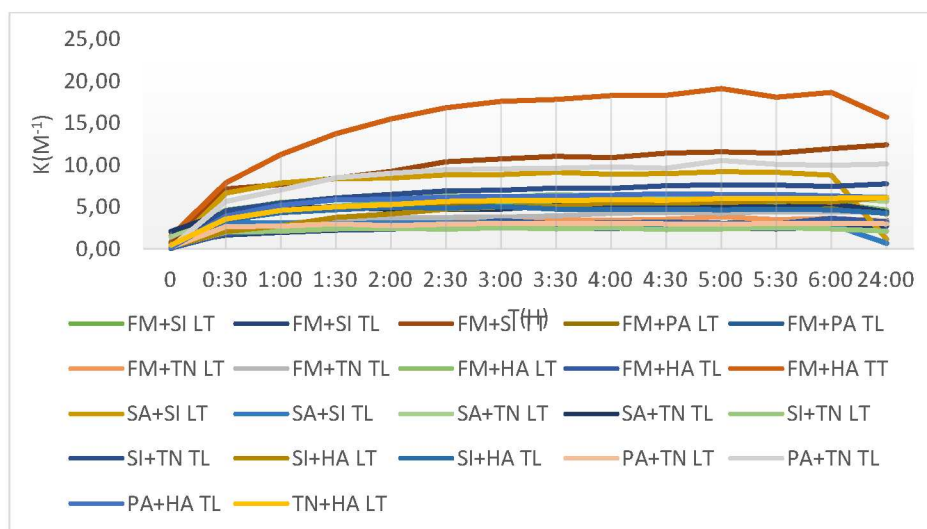
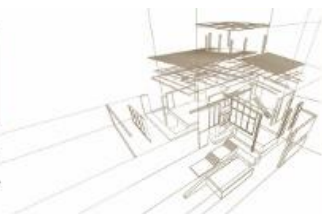


Figura 7: Tiempo vs deformación de probetas preseleccionadas



5.2. Análisis de resultados de la segunda fase

Como podemos ver en la siguiente figura la mayor deformación se presentó en la probeta FM+HA TT, una deformación mayor a 15 m^{-1} y que se presenta de manera más pronunciada en las primeras 3 horas de la exposición a el ciclo de humedad alta.

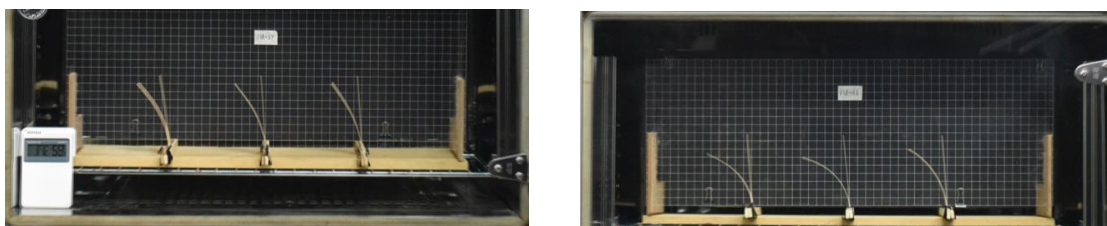


Figura 8: Comparación de estado inicial a la deformación máxima (FM+SY izq., FM+HA der.)

En el gráfico comparativo de tiempo vs deformación se muestra que la respuesta más pronunciada fue la de la combinación FM+HA TT, al igual que sucedió en la primera fase de ensayos, pero en menor magnitud, ya que en el ensayo anterior alcanzo 19.1061 m^{-1} a las 6:00 horas de exposición y en este ensayo el máximo promedio fue 12.7015 m^{-1} a las 26:30 horas (4:30 horas del segundo ciclo de secado). Por otra parte, la deformación y recuperación de las probetas es mucho más pronunciada en las primeras horas de los ciclos, recuperando un 64.2% de la deformación en la primera media hora del primer ciclo de humedad baja (pasando de 10.5157 m^{-1} a 3.7570 m^{-1}).

Durante el funcionamiento prolongado de la cámara de humedad se encontraron variaciones de humedad que se reflejan en la deformación de las probetas. Particularmente en el segundo ciclo de humedad alta donde la humedad tuvo una variación de 14%. Particularmente durante el segundo ciclo de humedad baja se presentaron variaciones de la humedad que se ven reflejadas en el comportamiento de las probetas, la humedad inicial de este ciclo fue de 42% y la final de 61%, este cambio se ve reflejado en un aumento de la deformación.

Se puede observar que después de los dos primeros ciclos aumentan tanto la deformación como la recuperación del material, lo que indica que el material presenta un comportamiento similar en varios ciclos aumentando su movilidad hasta que se estabilice su respuesta ante el estímulo.

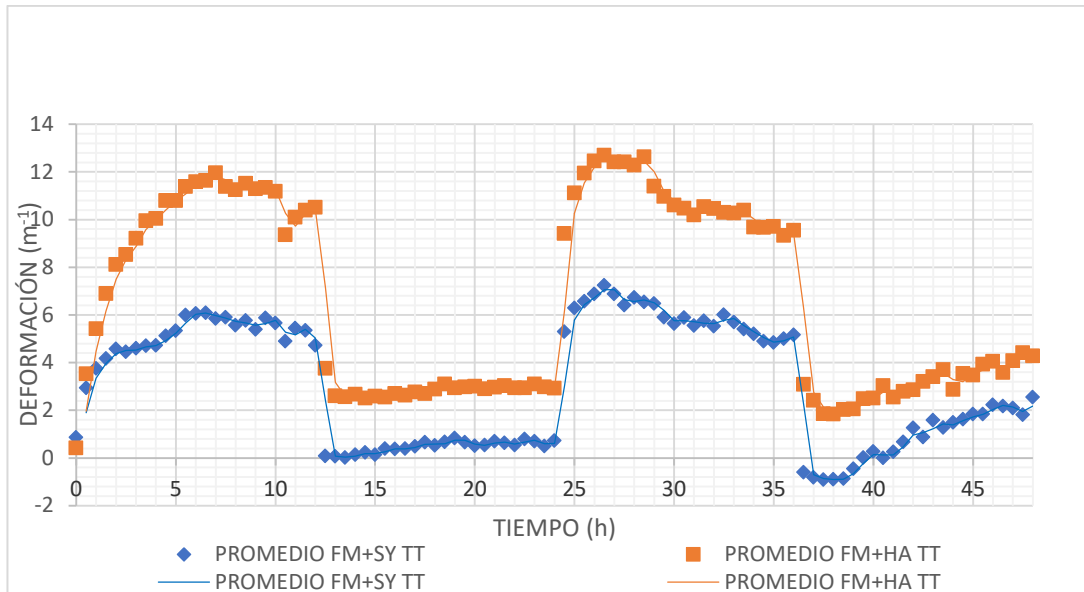
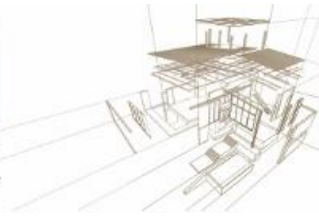


Figura 9: Tiempo vs deformación: comportamiento de las probetas

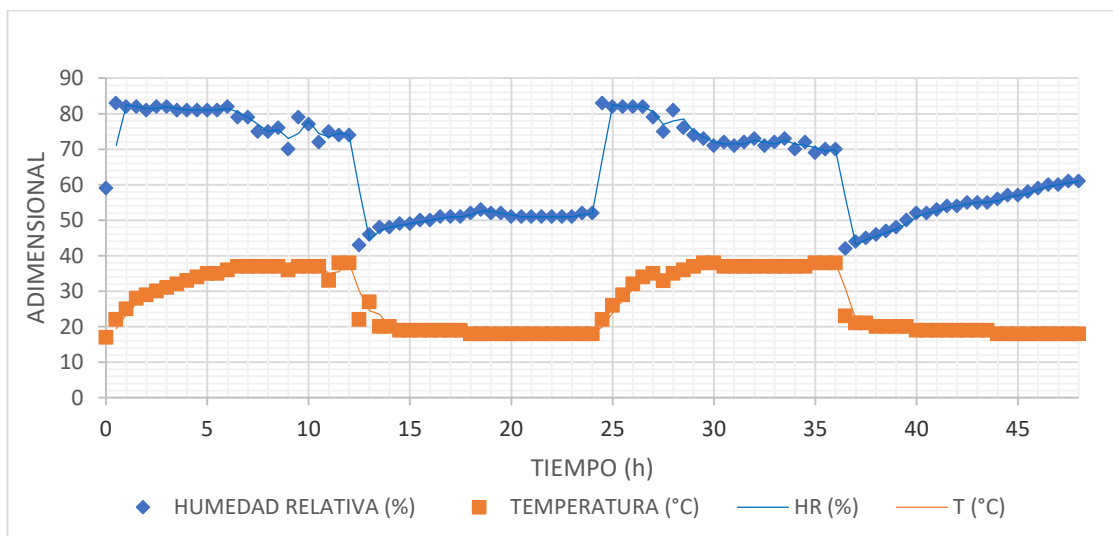
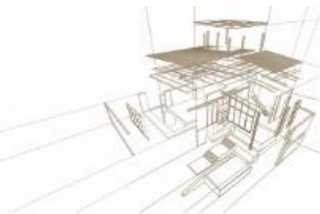


Figura 10: Tiempo vs humedad y temperatura durante los ciclos

6. CONCLUSIONES

Se encontró que el tiempo de respuesta promedio para llegar al 70% de la curvatura circular máxima oscila entre las 2 y 3 horas de exposición al 90% HR, la curva que describe la deformación presenta su mayor pendiente en este tramo inicial, la deformación máxima estas condiciones de humedad se presenta entre las 2 y 4 horas de exposición.

Se encontró que el tiempo de recuperación de la condición inicial ante condiciones de 42% HR es considerablemente corto y uniforme al proceso de deformación inicial,



recuperando el 61% de su deformación en la primera media hora, en algunos casos el material no se recupera completamente de la deformación inicial.

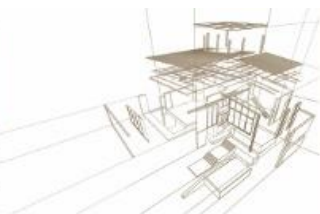
Se encontró en exploraciones iniciales que, con el material de interfase con el método de fabricación con adhesivo, algunas de las combinaciones presentan delaminación en las horas iniciales de estar expuestas al 90% HR, este fenómeno se debe a la gran diferencia de coeficientes de higror expansión y grosores, que genera tensiones internas en el bi-capa que no logra soportar la interfase.

Para la selección de la combinación final se priorizo el tiempo de respuesta con relación a la curvatura radial, junto con la capacidad de recuperarse de las deformaciones presentadas. La probeta que obtuvo mejor resultado fue: FM+HA TT. Con una curvatura circular de 1.8412 m⁻¹ a las 38:00 horas (dos horas del segundo ciclo de humedad).

Con base a la información anterior se infiere que el bicapa en madera con interfase de adhesivo ya mencionado presenta una respuesta lo suficientemente rápida y pronunciada bajo las condiciones de humedad determinadas como para ser considerado en el diseño de aplicaciones en arquitectura responsiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Meagher, "Designing for change: The poetic potential of responsive architecture," *Front. Archit. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 159–165, 2015.
- [2] N. Negroponte, "Toward a Theory of Architecture Machines," 1969.
- [3] T. D. E. Sterk, "Building upon Negroponte: A hybridized model of control suitable for responsive architecture," *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 2 SPEC. ISS., pp. 225–232, 2005.
- [4] P. Beesley, U. Haque, O. Khan, T. Scholz, and M. Shepard, "Responsive Architecture / Performing Instruments," vol. 4, p. 45, 2009.
- [5] E. Reyssat and L. Mahadevan, "Hygromorph: from pine cone to biomimetic bilayers," *J. R. Soc.*, vol. 6, no. June, pp. 951–957, 2009.
- [6] S. Timoshenko, "Analysis of Bi-Metal Thermostats," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 11, no. 3, pp. 233–255, Sep. 1925.
- [7] A. Holstov, B. Bridgens, and G. Farmer, "Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 570–582, Nov. 2015.



COMPORTAMIENTO DE VIVIENDA BIO-PASIVA TRAS OCHO AÑOS DE EXPOSICIÓN EN CLIMA OCEÁNICO

PERFORMANCE OF A SINGLE FAMILY BIO-PASSIVE HOUSE AFTER EIGHT YEARS EXPOSITION IN OCEAN CLIMATE

Lozano, Alfonso ⁽¹⁾*; Lorenzo, David ⁽²⁾; Alonso, Mar ⁽³⁾; Álvarez, Felipe ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Profesor titular de universidad. Área de Ingeniería de la Construcción. Universidad de Oviedo. España

⁽²⁾ Profesor asociado, Universidad de Santiago de Compostela. España

⁽³⁾ Profesor ayudante doctor. Área de Ingeniería de la Construcción. Universidad de Oviedo. España

⁽⁴⁾ Profesor ayudante doctor. Área de Ingeniería de la Construcción. Universidad de Oviedo. España

* Contacto: alozano@uniovi.es

Resumen

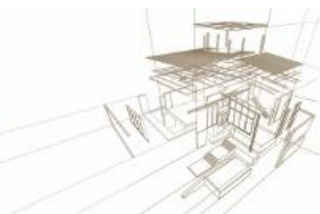
A mediados del año 2011 concluyó la construcción de una vivienda unifamiliar en Llanes (Asturias–España). La edificación, ejecutada bajo criterios de Bioconstrucción y constituida por muros de carga de madera contralaminada, fue diseñada según el estándar Passivhaus, y se certificó bajo este sello pocos meses más tarde. Además de su estructura, ejecutada completamente en CLT y los aislamientos térmicos y absorbentes acústicos, fabricados todos ellos a partir de corcho natural, en el inmueble se utilizó madera de castaño (*Castanea sativa*) para las carpinterías y madera termotratada de conífera (*Pinus radiata*) en gran parte de los revestimientos exteriores. Habida cuenta de que era la primera vez que en España se combinaban las técnicas de Passivhaus con biomateriales, durante los cinco años posteriores a su entrega, la vivienda se monitorizó con el fin de comprobar la bondad de los sistemas de calefacción y analizar la calidad del aire interior (concentración de CO₂ e ionización, fundamentalmente). Al mismo tiempo, durante estos años y los siguientes se aprovechó para estudiar el comportamiento y la durabilidad de los componentes de madera y sus derivados en un inmueble construido muy próximo al mar, en pleno clima oceánico y en una zona muy afectada por termitas subterráneas. La ponencia describe la tipología constructiva y los materiales empleados en la edificación, y posteriormente expone el comportamiento a lo largo de estos años de los elementos de madera más significativos utilizados en la vivienda.

Palabras-clave: vivienda pasiva, bioconstrucción, comportamiento, clima oceánico.

Abstract

Write In the middle of the year 2011 the construction of a family house in the town of Llanes (Asturias - Spain) was completed. The building, built under Bioconstruction criteria and constituted by load-bearing walls of CLT, was designed according to the Passivhaus standard, and was certified by this organization few months later. In addition to its structure, completely made of CLT boards, the thermal insulation and acoustic absorbers were formed from natural cork, chestnut wood (*Castanea sativa*) was used for carpentry and thermally modified wood (*Pinus radiata*) on the facades and deckings. Given that it was the first time in Spain that Passivhaus techniques and biomaterials were combined in a building, during the five years after its construction, the house was monitored in order to check the goodness of the heating systems and analyze the quality of the indoor air (concentration of CO₂ and ionization, fundamentally). At the same time, during these and the following years, it was used to study the performance and durability of wood components against aging in a house built very close to the sea, in an oceanic climate and in an area very affected by subterranean termites. The paper describes the construction typology and the materials used in the building, and exposes the performance over these years of the wooden elements of the house.

Keywords: passive house, bioconstruction, performance, ocean climate.



1. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA: MATERIALES

Concebida por el estudio Duque y Zamora Arquitectos, Se trata de una vivienda unifamiliar de aproximadamente 180 m² construidos y 133 m² útiles, que integra un diseño de acuerdo con el estándar Passivhaus y una ejecución bajo criterios de Bioconstrucción. Es decir, que se definió persiguiendo un doble objetivo: alcanzar unos niveles de consumo energético muy bajos, con materiales y sistemas constructivos que primasen la máxima protección para la salud de los trabajadores, de los usuarios finales y por supuesto del Medio Ambiente (Lozano et al 2013).

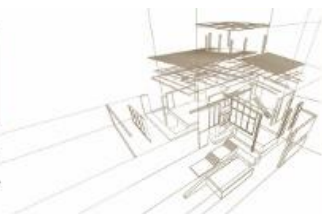
El proyecto ha respetado la topografía original y la vegetación autóctona de esta zona de la costa asturiana, consiguiendo una perfecta adaptación al entorno. Para ello se planteó una envolvente sin puentes térmicos y muy estanca que, junto al uso de doble acristalamiento bajo emisivo de Argón, consiguió que la transmisión térmica media de la vivienda fuese de solo 0,2W/m²K.

La forma y ubicación del edificio, así como la distribución interior, han sido diseñadas para obtener el máximo aprovechamiento de los recursos naturales del clima, y por consiguiente lograr un menor consumo energético. Así, la ubicación se definió previo análisis de la radiactividad natural del entorno, muy baja al estar sobre terreno calizo, y posterior estudio geobiológico para ubicar las zonas de descanso (Duque, I. y Zamora, A. 2013).

Después, utilizando como modelo la arquitectura popular asturiana, se contempló una galería de madera termotratada orientada al Sur, de manera que este espacio actuase como un invernadero encargado de acumular el calor en aquellos materiales con mayor inercia térmica, como por ejemplo pavimento de piedra caliza.

La elección de todos los materiales se ha realizado primando aquellos de probada durabilidad, altas prestaciones y menor impacto ambiental, reciclables y también con propiedades más saludables. Pero que igualmente ofrezcan buenas prestaciones impermeabilizantes, aislantes y de acumulación de calor, permeables a la difusión de vapor de agua e higroscópicos, de manera que permitan la ejecución de paramentos estancos al aire y al viento.

Para lograr estos objetivos, se eligieron componentes y elementos constructivos en su mayoría de origen orgánico y 100% renovables, de madera y derivados. Exceptuando la cimentación, ejecutada con hormigón de baja radiactividad y las láminas de caucho butilo para la impermeabilización de la solera y los arranques de muros de carga (Figura 1), la estructura está constituida por paneles de madera contralaminada (CLT) de abeto rojo (*Picea Abies*) con adhesivos de baja emisión de formaldehído (Figura 2), los aislamientos térmicos son placas de corcho natural en fachadas y cubierta y vidrio celular bajo la cimentación, carpinterías de madera de castaño (*Castanea sativa*), tarima flotante de madera maciza dispuesta sobre manta de corcho y revestimientos de cal natural y madera termotratada de conífera (*Pinus radiata*) para las galerías y pavimentos exteriores de la fachada Sur.



Figuras 1 y 2: Muros de carga de CLT y detalle de los arranques.

Las instalaciones son sistemas biocompatibles, con tubería, cableado y material eléctrico de polipropileno, placas fotovoltaicas para la producción de A.C.S., etc. La calefacción consiste en un sistema de ventilación mecánica con recuperador de calor, consiguiendo una demanda de 12 kWh/m²a y que cumple con los estándares energéticos de Passivhaus.

Por último indicar que también se tuvo en cuenta la reutilización del agua de lluvia para la lavadora, los inodoros, la limpieza, y el tratamiento de las aguas negras mediante un digestor de oxidación total para su posterior uso en el riego.

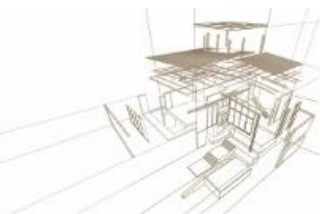
La ejecución concluyó en el mes de julio de 2012 (Figuras 3 y 4) y su ocupación se llevó a cabo inmediatamente después.



Figuras 3 y 4: Fachadas Sur y Norte y Este de la vivienda.

2. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA GARANTIZAR LA DURABILIDAD

Con independencia de las cuestiones relacionadas con la consecución de los parámetros exigidos por el Estándar Passivhaus, la baja durabilidad de la madera de *Picea Abies* constituyente de los paneles de CLT frente a los ataques de hongos de pudrición y termitas (Lozano A. et al 2015), combinada con la exposición a un clima lluvioso, húmedo y cálido, como es el oceánico (David Lorenzo et al 2018), obligó a diseñar adecuadamente determinados detalles constructivos que redujesen, en la medida de lo posible, la retención y el contacto prolongado con el agua de lluvia y la procedente del terreno.



Asimismo, también las pavimentos exteriores y galerías de *Pino radiata* termotratado, son susceptibles de sufrir daños por termitas, máxime si se tiene en cuenta que a poca distancia de esta vivienda se sitúa un núcleo de edificios muy afectados por este tipo de insectos xilófagos.

Y en último caso no puede olvidarse a la acción de los rayos UVA, que sin duda incide como mínimo en la tonalidad y en el aspecto de la madera dispuesta en el exterior.

Por todo ello se consideró imprescindible analizar el diseño constructivo, prestando atención a los detalles relacionados con los muros de carga, las cubiertas, las carpinterías, la galería y los suelos de madera previstos en el exterior (Kassal B 2014). A continuación se expondrán algunas de las características tenidas en cuenta en la puesta en obra de estos elementos constructivos.

2.1. Muros de carga

Como en cualquier edificación de muros de carga, la humedad ascensional es un problema que afecta directamente a la durabilidad, a la salubridad y finalmente a la estabilidad de este tipo de estructuras. Pero en climas húmedos, también es fundamental eliminar la posibilidad de condensaciones, tanto superficiales como intersticiales.

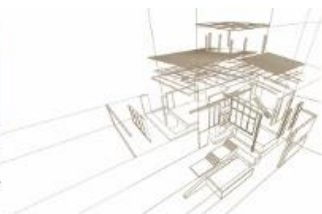
En el caso de esta vivienda Bio-Pasiva ubicada a poco más de 500 m del mar, además del agua procedente del terreno, evitada con la lámina de caucho bitulo dispuesta bajo los durmientes de reparto (ver Figura 1 anterior), también se tuvo en cuenta la estanqueidad de la envolvente (parámetro fundamental en el caso de edificaciones pasivas), para lo cual se utilizaron bandas dobles de caucho y láminas de estanqueidad como refuerzo en la unión entre paneles.

Respecto a las filtraciones y condensaciones, que a largo plazo podrían reducir la durabilidad tanto de los paneles de CLT, se evitaron con la disposición de láminas impermeables transpirables, con $S_D = 0,01$ y $S_D = 2,3$ en el exterior e interior, respectivamente. La Figura 5 muestra un detalle de las líneas dobles de caucho EPDM dispuestas en los cantos de los paneles, y las láminas de polipropileno como protección adicional en cada junta. Por su parte la Figura 6 refleja colocación de la primera línea de estanqueidad ($S_D = 2,3$) y la impermeabilización de la solera soporte del decking de madera termotratada en la fachada Sur.

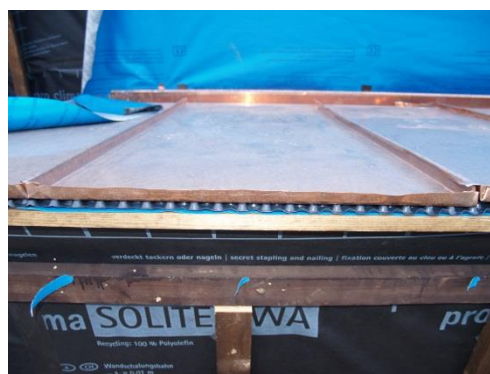


Figuras 5 y 6: Láminas y sellados de estanqueidad y solera del decking.

2.2. Cubiertas



Para evitar las condensaciones bajo las cubiertas, rematadas con teja en el cuerpo principal y cobre en la galería, se dispusieron rastreles de duramen de madera de castaño para el primer caso (Figura 7), mientras que en la galería se utilizaron placas gofradas de polietileno (PE) con simple nódulo para facilitar la ventilación del intradós de la chapa (Figura 8).



Figuras 7 y 8: Rastreles de duramen de castaño para la teja y placa de PE bajo el cobre.

2.3. Carpinterías

Es el punto débil de todas las fachadas y especialmente a vigilar en el caso de muros portantes de CLT. En esta vivienda se prestó especial cuidado al sellado de todos los encuentros entre cada una de las piezas de láminas transpirables dispuestas bajo y encima de las placas de corcho.

La Figura 9 permite observar las bandas de sellado en las carpinterías de acceso a la terraza de la planta baja y una de las ventanas, respectivamente.

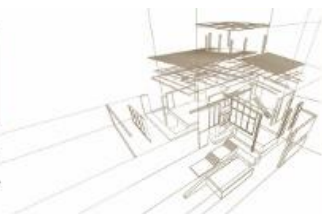


Figuras 9 y 10: Se prestó especial cuidado al sellado del perímetro de las ventanas.

En cuanto a los vierteaguas, se montaron con suficiente pendiente hacia el exterior, y estaban constituidos por un soporte base de paneles de yeso natural con fibra de celulosa resistentes al agua y revestidos con chapa de cobre.

2.4. Galería

Dado que en esta zona los vientos dominantes se orientan precisamente hacia la fachada Sur, y las lamas de madera termotratada de las galerías, de 21 mm de espesor, 80 mm de



ancho y diferentes largos, iban a situarse en sentido horizontal sobre rastreles de duramen de castaño, se eligieron piezas con corte oblicuo, inclinado hacia el exterior, desestimándose el habitual machihembrado para reducir las posibilidades de retención de agua en las ranuras. La fijación incluyó una mínima holgura para absorber los cambios pequeños volumétricos que podrían sufrir las lamas, al tiempo que se permite la aireación del trasdós, tal y como funcionaría una fachada ventilada. Sin embargo, para las esquinas, el proyecto especificaba encuentros en inglete, confiando en que se mantuviese la unión gracias la estabilidad dimensional que proporciona el termotratamiento (Figura 11).



Figura 11: Lamas en bisel y encuentros en inglete para las galerías.

2.5. Suelo de la terraza

El último elemento constructivo ejecutado en madera fue el suelo de la terraza existente en la fachada Sur, realizada también con lamas de madera termotratada de *Pinus radiata* situadas sobre rastreles de madera de castaño, apoyados a su vez sobre un soporte de gravas extendidas sobre la solera de hormigón, con pendiente hacia el exterior.

Las tablas, de sección rectangular con 34 mm de espesor y 140 mm de anchura, tienen una longitud superior a los 2 m. La fijación es mediante herrajes ocultos, manteniendo una holgura en torno a los 20 mm para facilitar su secado y reducir la acumulación de materia orgánica entre las tablas. Además cuenta con un ranurado antiresbaladicidad en la cara superior.

Toda la madera expuesta a los rayos UVA recibió un tratamiento final mediante un lasur al agua, en color marrón, formulado con aceite de lino, resinas y pigmentos naturales (Figura 12).

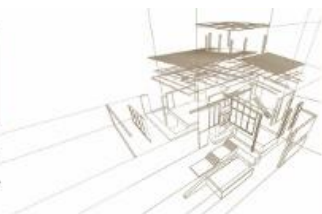


Figura 12: Terraza de fachada Sur en madera termotratada y protector UVA.

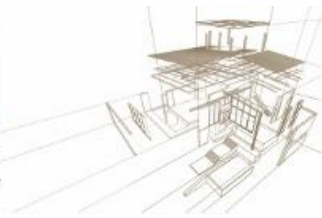
3. EVOLUCIÓN DEL EDIFICIO

Además de la medición de los consumos de electricidad y energía, durante el año 2013 se instalaron algunos dispositivos en el interior de la vivienda, para que pudiese llevarse a cabo un registro continuo de diversos parámetros relacionados con la salubridad del aire, entre los que destacan el nivel de CO₂ y la ionización del aire interior.

A lo largo de este periodo de tiempo y también en los años posteriores, también se llevaron a cabo otras visitas de control para analizar el comportamiento de los elementos de madera y sus derivados, colocados en el edificio, mediante métodos no destructivos (Divos F. et al 2011).

Los parámetros higrotérmicos y concentraciones CO₂ e iones positivos medidos dentro de la vivienda durante el periodo de seguimiento fueron óptimos. Y lo mismo puede decirse respecto a la estanqueidad al agua y al viento (De Oliveira E 2015).

Simplemente hacer constar que en el verano de 2016, exactamente cuatro años después de entrega la vivienda, debido al tono agrisado que habían adquirido la madera instalada en las galerías, se renovó el tratamiento de las piezas dispuestas en las fachadas, utilizándose en este caso un producto base cera con propiedades hidrofugantes. Por el



contrario, en la tarima exterior no aplicó ningún acabado con el objeto de que la madera adquiriese el tono agrisado característico con el paso del tiempo.

4. ESTADO ACTUAL

Hasta el momento la estanqueidad de la vivienda sigue siendo perfecta, lo que ha evitado el desarrollo de mohos y hongos de pudrición en ningún punto de la vivienda. Es decir, que además de la salubridad de la vivienda, también la estabilidad y seguridad de sus elementos portantes a medio plazo está garantizada, a pesar de la agresividad de su exposición y la baja durabilidad de la madera utilizada en la estructura.

En al exterior, tras ocho años de exposición, los perfiles de madera termotratada siguen manteniendo el anclaje, las juntas y los encuentros prácticamente idénticos al inicial (Figura 13). También puede apreciarse el perfecto estado de la arista, a pesar de la debilidad de esta unión (Figura 14). Como puede comprobarse, también se mantiene la tonalidad tras la aplicación del tratamiento protector en el año 2016.



Figuras 13 y 14: Perfecto estado de las uniones entre las tablas de madera termotratada.

Por el contrario, puesto que la tarima exterior no había recibido ningún producto de acabado, la tonalidad era la grisácea característica de la madera expuesta a la radiación UVA (Figuras 15 y 16). A pesar de ello, y gracias a la ventilación inferior y a la separación entre las tablas, no se detectaron pudriciones o ataques de insectos xilófagos en ninguna zona del pavimento.



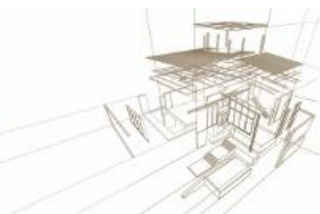
Figuras 15 y 16: Tono agrisado de la tarima exterior.

Finalmente y a modo de anécdota, hacer constar que durante la construcción de la vivienda se habían detectado pequeños hinchamientos de los paneles de CLT, debido a la elevada humedad relativa del aire en esta localización geográfica a lo largo de todo el año. Esta circunstancia obligó a cepillar superficialmente aquellos paneles que iban a servir de soporte a algunos tableros de fibra de celulosa aglomerados con yeso natural, una vez alcanzada la Humedad de Equilibrio Higroscópico del CLT. En la actualidad ninguno de los paneles manifestó nuevos cambios volumétricos por lo que los paramentos verticales interiores conservaron la planitud correcta.

5. CONCLUSIONES

Tras ocho años de exposición en clima oceánico y a poca distancia de la costa, la vivienda Bio-Pasiva construida en Llanes (Asturias), sigue manteniendo las mismas características y prestaciones que en el momento de su entrega. Efectivamente, tras la revisión e inspección del contenido de humedad de sus muros de carga y forjados puede afirmarse que hasta el momento no se han detectado filtraciones de agua o de aire, fisuraciones o grietas por hinchamientos o mermas de los paneles; o incluso debido a problemas mecánicos o elásticos. Además el control y seguimiento de los consumos de energía y las mediciones de las ambientales interiores han permitido verificar que las condiciones de confort dentro del edificio son óptimas. En definitiva, que se trata de una tipología constructiva muy adecuada para ejecutar viviendas pasivas en climas oceánicos.

Por otra parte, en lo que concierne a la estética, en esta ubicación y tras la aplicación de un correcto programa de mantenimiento, la madera termotratada tanto en los perfiles que componen la fachada, como en las tablas del entarimado exterior sigue mostrando un aspecto que puede calificarse de muy bueno. A este respecto se informa que en otras situaciones geográficas más extremas, con periodos secos con muy baja humedad relativa, es frecuente observar la apertura de fendas en las tablas utilizadas como revestimientos de suelos y fachadas; y tras las épocas de lluvia, la madera termotratada sí presentaba un evidente deterioro a causa de los hongos.



En definitiva, en esta ubicación concreta, el termotratamiento de la madera sí mejora la estabilidad dimensional de las piezas de madera en condiciones climáticas variables pero con humedades relativas bastante homogéneas, minimizando la posibilidad de aparición de alabeos o fendas.

Por otra parte se incrementa la durabilidad frente a los hongos xilófagos e insectos de ciclo larvario sin tener que aplicar productos químicos, con lo que se asegura un producto totalmente ecológico, libre de aditivos químicos y por ende apto para emplearse en Bioconstrucción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lozano, A. et al. (2013). Towards a more efficient construction. Passivhaus+Bioconstruction. Proceeding of International Conference on Research in Construction, Madrid, Spain.

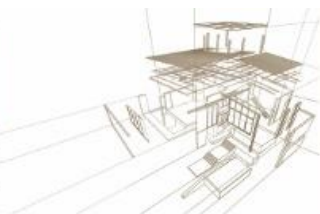
Duque, I., Zamora, A. (2013). Casa EntreEncinas: Casa Certificada Passivhaus con criterios de Bioconstrucción. 5ª Conferencia Española Passivhaus, Gijón, Spain.

Lorenzo D. et al (2015). Durability, use classes and weather conditions: the problem of fir and spruce timber bridges built in northern Spain, due to several and early wood decay attacks. 3rd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS), Wroclaw, Poland.

Kasal B. (2014) Structural health assessment of in situ timber: An interface between service life planning and timber engineering. Int. J. Wood Material Science and Engineering, v. 9, p 134-138.

Divos F et al (2011). Evaluation of historical wooden structures using nondestructive methods. Proceedings of the international conference on structural health assessment of timber structures, Lisbon, Portugal.

De Oliveira E et al (2015). Monitoring and auditing of indoor air quality in European buildings: status and perspectives. European Conference on Healthy Buildings, Eindhoven, Holland.



ANÁLISIS NUMÉRICO DEL DESEMPEÑO ANUAL DE ENERGÍA DE LOS EDIFICIOS DE MADERA EN CHILE

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ANNUAL ENERGY PERFORMANCE OF TIMBER BUILDINGS IN CHILE

Matteo Dongellini^{1*}, Elena Vanzini¹, Federica Morandi², Frane Zilic³, Jorge Calderón Díaz⁴, Gian Luca Morini¹

¹Department of Industrial Engineering, University of Bologna. Bologna, Italy

²Faculty of science and technology, Free University of Bozen. Bozen, Italy

³Universidad de Concepción. Concepción, Chile

⁴Crulamm. Concepción, Chile

* Contacto: matteo.dongellini@unibo.it

Resumen

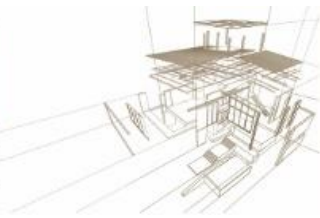
La investigación se centra en el análisis del desempeño anual de un edificio de referencia construido según los diferentes tipos de construcción: madera contralaminada, entramado liviano y mampostería. Los edificios se simulan mediante el software dinámico Trnsys en tres ciudades diferentes de Chile (Concepción, Santiago y Osorno), que se distinguen por diferentes condiciones climáticas. Los modelos dinámicos desarrollados se han afinado al desempeño energético del ed utiliza un sistema de ventilación ificio real, ubicado en el norte de Italia. El diseño del sistema HVAC acoplado a los edificios simulados mecánica para el cambio de aire y deshumidificación, y una bomba de calor aire-aire para la climatización de zonas térmicas. Para cada combinación de ubicación de construcción considerada en este trabajo, el rendimiento energético general se evalúa y compara entre sí, en términos de la demanda de energía neta del edificio, el consumo de energía primaria del sistema HVAC y el factor de rendimiento estacional (SPF) de la bomba de calor. El análisis muestra que, si se considera la demanda de energía de calefacción, las dos estructuras de madera se caracterizan por una solicitud de energía similar, mientras que la adopción de la estructura de mampostería determina un aumento del 26% para el consumo de energía de calefacción. El requerimiento de energía para enfriamiento está presente solo en Santiago, aunque en cantidades mínimas. Además, teniendo en cuenta la ciudad de Santiago, se ha verificado que la bomba de calor aire-aire propuesta se caracteriza por una eficiencia adecuada, tanto durante la temporada de calefacción como durante la temporada de enfriamiento: el SCOP calculado es de alrededor de 4, mientras que el valor de SEER es de aproximadamente 3.

Palabras-clave: simulaciones dinámicas, eficiencia energética, edificios madera, recuperación de calor.

Abstract

The research focusses on the analysis of the annual energy performance of one reference building built according to different construction types: mass timber, timber frame and masonry. The buildings are simulated by means of the dynamic software Trnsys in three different cities of Chile (Concepción, Santiago and Osorno), distinguished by different climatic conditions. The developed dynamic models have been tuned on the energy performance of the real building, located in Northern Italy. The design of the HVAC system coupled to the simulated buildings involves a mechanical ventilation system, used for air change and dehumidification, and an air-to-air heat pump, used for thermal zones climatization. For each combination building-location considered in this work the overall energy performance is evaluated and compared one another, in terms of building envelope net energy demand, HVAC system primary energy consumption and heat pump seasonal performance factor (SPF). The analysis shows that, if the space heating energy demand is considered, the two wooden structures are characterized by a similar energy request, while the adoption of the masonry structure determines an increase of 26% for the heating energy consumption. The energy requirement for cooling is present only in Santiago, albeit in minimal quantities. Furthermore, taking into consideration the city of Santiago, it has been verified that the proposed air-to-air heat pump is characterized by a suitable efficiency, during both the heating and the cooling season: the calculated SCOP is around 4, while the value of SEER is approximately 3.

Keywords: dynamic simulation, energy efficiency, timber buildings, active heat recovery.



1. INTRODUCTION

The residential sector accounts for 27% of global energy consumption and 17% of CO₂ emissions, playing an important role in climate change. Buildings consume electricity for lighting, domestic appliances and conditioning systems, but this still represents a small percentage of all the energy needs of the residential sector, which consists mainly of space heating, domestic hot water production, space cooling and air climatization (Payam *et al.*, 2014). The energy savings in this sector are closely linked to the insulation of the building envelope (Byrne *et al.*, 2009), through the choice of innovative construction elements combined with adequate insulation materials, in order to reduce heat losses to the environment, and to the improvement of the HVAC system, through the optimization of its performance and the use of renewable energy sources. The final objective is to obtain nZEBs, (i.e. nearly Zero Energy Buildings, (EPBD 2010/31/EU, EPBD 2018/844/EU)), characterized by almost no energy demand for heating or cooling, thanks to an optimization of the building-HVAC system coupling, the use of cutting-edge materials and construction techniques linked with in-situ renewable energy production.

Chile is moving fast towards sustainable development. The country ratified the Kyoto Protocol in August 2002, adhering to the common goal of reducing the consumption of fossil fuels, aiming to reach 20% of energy from unconventional renewables by 2025 and promoting energy production through renewable sources by 10% by 2024 (National Energy Strategy 2012-2024). The current Chilean regulation NCH 853 specifies the methodology for calculating the thermal transmittance (U-value) of opaque and transparent components that compose the building envelope. In August 2016, a preliminary project was approved with new provisions in order to provide thermo-hygrometric comfort for people, following the proposal to update thermal protection: the Article 4.1.10 of the General Ordinance on Urban Planning and Construction. In this document, *Anteproyecto de norma* (NTM 011/2 and NTM 011/3), the country is divided into 9 climate zones, from the hottest and desert areas (A) to the Antarctic glacial zones (I), and, for each zone, the requirements and certification mechanisms for the indoor air conditioning of buildings are re-established. The limits indicated by the draft standard mark a relevant improvement compared to the actual standard, but they are still quite lax compared to the limits imposed by the EU directives.

Promoting wood construction technologies can be considered interesting for a country like Chile, that counts on an extremely developed forestry sector (Tricallotis *et al.*, 2018). First, wood structure have an excellent response to seismic events and Chile is one of the areas with the greatest seismic risk in the world. The development and optimization of this type of construction is also linked to an energy efficiency perspective towards nZEBs, since wood is a renewable material with excellent insulation properties.

The present research work focusses on the analysis of the annual energy performance of three high-performance buildings that share the same geometrical features but that are designed according to different construction types, including timber construction technologies and traditional brick-concrete solutions. The energy model of each building is developed by means of the dynamic software TRNSYS (Klein *et al.*, 2010)



and simulations are performed considering different cities of Chile, distinguished by different climatic conditions. Thus, the annual energy consumption of each combination building-climatic area is calculated and compared to one another.



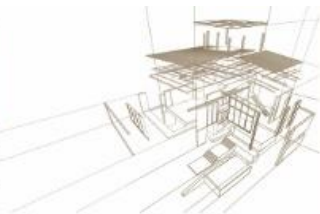
Figure 1. South-facing facade of the reference building.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1 Description of the reference building

The reference building considered in this paper is a recently built two-story house, located in Valenza, Northern Italy. The building is composed by two habitable floors, each corresponding to one apartment, plus a basement and a stairwell. The total net surface of the building is 297 m² for a total heated volume of 898 m³. The mezzanine floor, corresponding to the first apartment, has a volume of 392 m³ while the first floor has a variable height and has a volume of 506 m³. The building is characterized by a high performance envelope: in fact, the U-values of opaque and transparent elements are much lower than those imposed by current Italian law (DM 26/06/2015), thanks to the wide adoption of insulating materials and an innovative construction technology.

The external walls consist of 3-layer, 0.1 m thick Cross-Laminated timber (CLT) panels, and have an outer layer of 0.16 m wood fiber insulation and an inner thin layer of insulation (0.06 m) in the counter wall. A vapor restraint layer controls the passage of humidity through the wall avoiding condensation in the layer in contact with the wood. The outer part of the basement consists of 0.30 m concrete walls and a 0.16 m layer of wood wool insulation. The roof, also made of wood, is externally formed by a covering in steel sheet followed by a waterproof membrane to avoid water infiltration. An internal layer of raw spruce planks is followed by a ventilation chamber, necessary to detach the roof covering from the insulating layer, creating a gap that allows the circulation of a homogeneous flow of air, ensuring the elimination of humidity and increasing insulation performance. Then, a rock wool insulating layer is covered by a



bituminous waterproof sheet on the cavity side and followed by another vapor restraint layer. The floors are made of 5-layer 0.20 m CLT panels with a 0.1 m lightweight concrete overlay, followed by an acoustic interlayer, 0.03 m EPS insulation and a 0.06 m heavy concrete screed, with wood finishing. The interior walls are made of 2-layer plasterboard, enclosing a layer of wood fiber. Since no data on the transparent elements were available, high performance double-glazed Argon-filled windows, characterized by a U-value of 1.06 W/m²K and a G-value of 0.586, were used.

2.2 Preliminary modelling: reference energy performance

The reference building has been modelled by means of TRNSYS. More in detail, a thermal zone for each room was simulated, in addition to one for the stairwell and one for the basement, for a total of 22 zones. The thermal capacity that the software assumes as default was increased to take into account the presence of objects and furniture.

An hourly occupation profile was simulated; for each dwelling, the occupancy varies during the day from a minimum of 0 to a maximum of 4 people, in order to consider realistic and variable internal heat gains due to building occupants. According to the international standard ISO 7730 (ISO, 2005), a heat gain of 150 W per person was introduced, equally shared between sensible and latent part; furthermore, the thermal power produced by people has been divided into the various zones proportionally to their area. For the evaluation of the sensible internal gains due to the devices, average values were obtained from the time profiles defined in the Italian standard UNI/TS 11300-1 (UNI, 2014).

A controlled mechanical ventilation (CMV) system was implemented within the model, characterized by a cross-flow heat recovery unit with a nominal efficiency equal to 90%, guaranteeing a constant air change of 0.5 vol/h. For periods in which the CMV system is not sufficient to keep the indoor humidity levels within non-dangerous values for the correct maintenance of the wooden building and the well-being of occupants, a dehumidification system is needed: for this reason, it was also implemented in the model.

In order to calculate the effective energy demand of the building, in addition to the constant air change due to the CMV, an infiltration rate of 0.1 vol/h was introduced (typical value for new buildings). Finally, internal set-point values for heating and cooling seasons were respectively fixed to 20 °C and 26 °C. The ideal energy demand of the reference building for both seasons and the design thermal/cooling load are reported in Table 1, where the energy performance indicator EP is defined as the ratio between the ideal energy demand and the net floor area of the building.

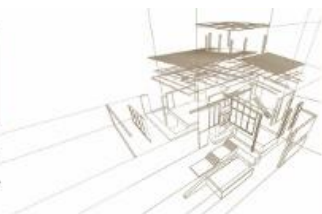


Table 1: Ideal energy demand and design thermal/cooling load of the reference building.

	Energy demand (kWh/year)	Design load (kW)	EP _i (kWh/m ² year)
Heating season	5610	4.5	19
Cooling season	3608	5.9	12

3. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

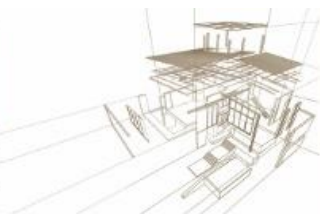
3.1 Analysis of the climate characteristics

Chile is characterized by the presence of extremely different climatic areas. In order to test the energy performance of timber buildings with respect to traditional buildings, three cities were taken as a reference: Santiago, Concepción and Osorno. The climatic characteristics of these locations have been analyzed, orienting the choice of the HVAC system and the refinement of the building envelope.

Santiago de Chile, the capital, is the most populated city in the country, with an average annual temperature of 14.6°C. Analyzing the temperature trend of a typical winter day for Santiago (June 15th), there is a noticeable thermal excursion during the 24 h period. The temperature range reaches 19°C, a really large value if we consider that the winter climate is generally characterized by small excursions. Similar considerations can be done for a typical summer day; analyzing the temperature trend of a typical summer day (December 14th), a significant thermal excursion also occurs between day and night - reaching 20°C. The fact that the outdoor air temperature decreases so much during the night, can be very advantageous as regards the possible exploitation of a free cooling ventilation system, which allows to lower the temperature inside the building with a really small energy consumption thanks to the introduction of fresh and properly filtered outdoor air. Furthermore, analyzing the irradiation values for Santiago, it is possible to notice that the incident radiation has interesting values also during the winter season, reaching a peak of 400 W/m² (total irradiation on the horizontal). This represents an advantage both for the possibility of covering a large part of the winter heating energy request through the solar input and for the possible option of a photovoltaic system. Moreover, in the summer season values of 1000 W/m² are also reached: for the reported reasons the installation of a photovoltaic (PV) system represents a suitable solution to produce renewable electric energy.

Concepción is one of the most populated cities in Chile. Compared to Santiago's climate, in the summer season the temperatures are lower and the average annual temperature is 12.1°C. The analysis of the daily temperature trend shows, also for Concepción, the convenience to propose a system that exploits this large thermal excursion through free-cooling operation. Also in this location irradiation values are favorable for the application of a photovoltaic system.

The last city considered in this work is Osorno, which has the coldest climate among the selected locations, with an annual average temperature of 10.5°C. The daily thermal excursion is reduced compared to the previous cases: for example, in winter days, the



typical temperature difference obtained along 24 hours is around 4°C. Finally, in Osorno the solar radiation is lower if compared to other cities: in winter an irradiation of 200 W/m² is reached, increasing to 700 W/m² in summer.

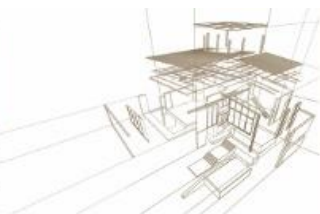
According to the climatic characteristics of the considered cities, the design of the building HVAC system was focused on the development of a system which uses air as thermo-vector fluid; more in detail, the plant uses the outdoor air, with no recirculation of indoor air, filters it and by means of heating/cooling coils treats the air flow in order to maintain the needed ventilation rate, ensure air renewal and guarantee proper comfort conditions within the building. Furthermore, the energy performance of the system is increased during the summer season, since according to the free-cooling operating mode takes advantage of the temperature difference between day and night, minimizing energy needs.

3.2. Re-modelling and simulation of the reference building in Chilean cities

Based on the reference building, in this work other two buildings, characterized by the same geometrical features but built by using different construction technologies, were simulated. In this way, the influence of the building envelope on the overall energy performance could be assessed. The first building resembles the reference one, made in CLT; the second one is designed in timber frame and the third one is a traditional masonry building. When changing the design from a construction system to another, minor modifications were done to the reference building in order to comply with the Chilean standards. The major differences are listed below.

Since the actual Italian law is more severe than the Chilean one, the U-value of the original CLT building envelope components is much lower than the transmittance limits reported by the Chilean standards. For the simulation in Chilean cities, however, a thinner insulation layer is proposed, in order to reduce the considerable difference between the U-values of the reference building and the limit values. For this reason, the thickness of the insulation was set at 0.12 m, compared to the 0.16 m present in the reference building, and the total thickness of the wall is reduced to 0.32 m; to conclude, the external wall transmittance is now equal to 0.173 W/m²K. The requirements of the Chilean *Anteproyecto de Norma* would be complied also if the external insulation was completely removed, both because the requirements are relatively soft and because of the low thermal conductivity of wood. Nonetheless, the problem in this case would derive from the possible formation of interstitial humidity condensation, a critical point for wood structures.

The timber frame building external walls, also having a thickness of 0.32 m, are made with solid wood uprights in which wood wool insulation is inserted. The presence of the wooden studs that interrupt the insulation would determine a thermal bridge, so an additional 0.06 m wood wool layer was added. The structure is completed on both sides with 13 mm OSB panels, interposing the vapor restraint between the panel and the insulation. Immediately after the plasterboard, on the inner side, an air gap was left for the installation of the ducts, in order to avoid placing them in the frame. The resulting overall transmittance of the wall is 0.172 W/m²K, the same value resulting for the external wall of the CLT building.



The masonry building was realized with 0.24 m hollow bricks. To keep the external wall thickness almost constant among all simulated buildings, the thickness of the insulation layer was reduced to 0.08 m, resulting in a total thickness of the wall of 0.34 m. In this way, the U-value of this element is slightly greater compared to the one of the two wooden buildings previously described, reaching 0.34 W/m²K. While for the wooden solutions the roof was a ventilated wooden roof, in this case the roof is made of tiles and a brick-concrete layer. The same thickness of wood fiber insulation was inserted inside the roof of the wooden buildings, reaching the same U-value of 0.22 W/m²K. The three types of buildings described before were simulated in the three selected Chilean cities, for a total of 9 simulations. For each simulation, the internal heat gains due to occupants and to the devices have been modeled as for the Italian reference building. The ideal energy demand of the buildings were therefore obtained, maintaining a constant internal set-point temperature of 20°C in winter, 26°C in summer and a volumetric air change rate of 0.5 vol/h, in addition to the infiltrations considered equal to 0.1 vol/h.

Table 2: Ideal energy demand for the buildings located in the three Chilean cities.

City	Space heating (kWh)			Space cooling (kWh)		
	CLT	Frame	Masonry	CLT	Frame	Masonry
<i>Concepción</i>	7595	7546	10140	20	13	5
<i>Santiago</i>	7270	7243	9323	944	898	724
<i>Osorno</i>	10940	10876	14363	25	17	9

The results, presented in Table 2, show that the energy demand for space heating for masonry building is on average 25% greater than for timber buildings, independently from the location. Moreover, the energy need for heating is greater for the city of Osorno, which has the coldest climate, if compared to the other cities: in Concepción and in Santiago the ideal heating energy demand is 31% and 34% lower, respectively. Since masonry buildings are less isolated with respect to wooden ones, the energy demand for cooling is reduced. The only buildings that have a significant need for space cooling, whatever the type of construction adopted, appear to be those simulated in Santiago, which climate is characterized by external air temperatures above 26 °C for a significant part of the season.

Finally, the values of the ideal energy performance indicator for each building are shown in Table 3. The buildings in Osorno are characterized by the highest value of EP_h, while the city with the lowest heating energy demand is Concepción. It is evident that the masonry buildings generally have the larger values of EP_h: the highest EP_h is that associated to Osorno for the masonry building, reaching 48 kWh/m²year. Finally, it is important to highlight that the only city that has a request for space cooling is Santiago.

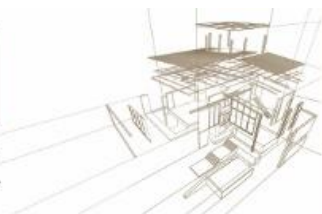


Table 3: Energy performance indicators for each building in the Chilean cities.

City	EP _h (kWh/m ² year)			EP _c (kWh/m ² year)		
	CLT	Frame	Masonry	CLT	Frame	Masonry
<i>Concepción</i>	25	25	34	0	0	0
<i>Santiago</i>	24	24	31	3	3	2
<i>Osorno</i>	36	36	48	0	0	0

3.3 Optimization of the HVAC system

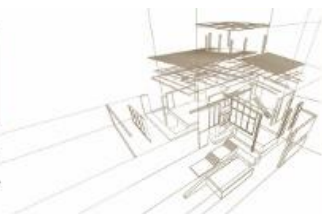
Generally, in nZEBs the building envelope components are characterized by very low values of thermal transmittance; for this reason, the building design load and, consequently, the overall energy needs for space heating/cooling significantly decrease.

As a consequence, in this kind of buildings ventilation service acquires a greater importance to ensure ideal comfort: in fact the energy requirements for the renewal of indoor air is continuously increasing, since the hourly renewal rate to guarantee indoor air quality is relevant in well-insulated and hermetic buildings.

All these considerations led to the choice of an innovative system that combines heating, cooling and CMV in a single device to optimize the overall energy performance of the HVAC system. This device is able to guarantee the required air renewal rate and simultaneously cover the required load simply by cooling or heating the incoming air from the outside, via an air-to-air heat pump. The system can also operate in free-cooling mode during the summer season, to completely satisfy the cooling energy demand assessed in Santiago: during the night, the air flow rate is increased and the heat pump is switched off, thus exploiting for free the large daily thermal excursion.

The device proposed and simulated in this work is composed by a CMV system characterized by active heat recovery: a reversible air-to-air heat pump uses as heat source/sink the air flow entering and exiting the building, depending on the operating mode of the unit. The appliance has three operating modes:

- *Winter mode*: while the internal air (at a temperature of about 20 °C) is extracted from the conditioned zones, it is used as the heat pump heat source, flowing through the evaporation coil; then, the external air is the heat sink and it is directly heated by the condensing coil of the heat pump. The unit energy performance is extremely high since the heat source and the heat sink are characterized by high and low temperatures, respectively.
- *Summer mode*: When the machine is operating in summer mode, the cycle is reversed. The internal air, at a temperature of about 26°C, is exploited by the condensing coil as heat sink before it is expelled outdoor. Moreover, the external air is filtered, cooled and consequently dehumidified by passing through the evaporating coil before being introduced into the internal environment.



- *Free-cooling mode:* During the summer season, the building envelope tends to accumulate heat during the central hours of the day and then rejects it during the night due to the envelope thermal inertia: in these conditions the heat pump is deactivated and the device allows the introduction of external air with the simple operation of the fans (free-cooling).

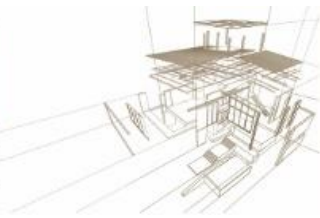
The energy performance of the heat pump and of the dehumidifier has been simulated with TRNSYS for each case and compared to one another. The electrical energy absorbed by the heat pump (E_{el}) was divided into three components: the energy due only to the fans during free-cooling operation (E_{fan}), the electric energy absorbed in the heating operating mode (E_h) and the electric energy absorbed in the cooling working mode (E_c). It is important to stress that E_h and E_c take into account also the energy need for the fans during heating and cooling mode, respectively. The energy demand for cooling, divided between sensible (E_{sens}) and latent (E_{lat}), and the values of thermal energy delivered to the building (E_{th}) were also obtained, linked to the seasonal performance factor of the unit during heating and cooling seasons (SCOP and SEER, respectively). If the dehumidifier is considered, the absorbed electric energy (E_{el}), the latent (E_{lat}) and the total energy (E_{tot}) supplied by the device and the volume of condensed water were obtained.

While the detailed discussion of all obtained results is left for a future insight, it is worth noting that a reliable comparison between the considered cases requires identical internal conditions for each model; therefore, for the masonry building, the size of the air-to-air heat pump has been increased by 50% in Concepción and by 30% in Santiago when compared to wooden buildings. Finally, in Osorno, the city characterized by the coldest climate, the heat pump size was increased by 20% for the timber buildings and by 70% for the masonry building with respect to its commercial size.

The annual energy performance indexes calculated for the three buildings in the three climatic zones is reported in Table 4. The timber buildings (both CLT and timber frame) maintain extremely low EP values for all cities, with 22 kWh/m² per year for Concepción, 27 kWh/m² per year for Santiago and 28 kWh/m² per year for Osorno. Masonry buildings, on the other hand, have higher EP values; for each city the annual energy requirement for heating, cooling and ventilation is about the 25% higher than the one of wooden buildings.

Table 4: Annual energy performance indexes calculated for all cases.

City	EP (kWh/m ² year)		
	CLT	Frame	Masonry
<i>Concepción</i>	22	22	29
<i>Santiago</i>	27	27	34
<i>Osorno</i>	28	28	35



The values of SCOP derived from the simulations are around 3.88 and 3.90 for Concepción, while they increase for Santiago, reaching 3.97-3.99. This is due to the fact that the city of Santiago is characterized by cooler temperatures for a longer time during the year, which allows the device to operate with a better efficiency. The same can be said for Osorno, in which the calculated SCOP is equal to 3.99 and 4.00: in fact even for this last city the temperatures are lower than those of Concepción. The SEER index is analyzed in order to evaluate the performance of the machine during the cooling season: it maintains a constant value of 3 up to the external air temperature of 33°C, temperature above which it starts to slightly drop.

4. CONCLUSIONS

The research work investigated the energy performance of timber and masonry buildings through the simulation in different Chilean cities (Santiago, Concepción and Osorno). The reference building considered in this work is a real CLT construction located in Italy and characterized by two independent dwellings with a floor area of 150 m² each. The energy performance of the building and its HVAC system were simulated with the dynamic software TRNSYS. In the reference building, each apartment was equipped with a dehumidifier and controlled mechanical ventilation system, both necessary to guarantee internal air freshness and to maintain humidity within limits that avoid the degradation of wood elements. From the simulations, an ideal energy requirement of 19 kWh/m² and 12 kWh/m² per year was obtained for the winter and the summer season, respectively, extremely low values due to the considerable insulation of the building.

The envelope of the building was then modified to simulate a timber frame and a masonry building encompassing the same geometrical characteristics. In this way, the differences among the construction techniques were analyzed, taking into account the annual energy performance of the HVAC system. The annual simulations of the nine considered cases were carried out, obtaining first the ideal annual energy requirement of the building envelope. Space cooling energy need is present only in Santiago, albeit in minimal quantities (3 kWh/m² per year). On the contrary, it was noted that the two wooden structures show the same energy demand for space heating (24 and 25 kWh/m² per year for the cities of Santiago and Concepción, 36 kWh/m² per year for the city of Osorno) while the masonry structure is linked to an increase of 26% for the heating energy needs.

Then, the work focused on the optimization of the HVAC system to be combined with the nine analyzed structures. The importance of maintaining humidity levels within limited ranges has led to the choice of a controlled mechanical ventilation system, equipped with an active dynamic heat recovery unit that uses a reversible air-to-air heat pump so satisfy heating and cooling energy needs. This system allows to cool, heat and ventilate through a single device. A further advantage of the chosen unit is that it can exploit free-cooling during the summer, due to the large daily thermal excursion typical of Chilean climate. The results point out that the masonry construction type is in any case the structure that requires the greatest energy consumption (about 25% more than both the wooden typologies), which is partly justified by the fact that, given the same thickness of the external wall, the masonry structure is less insulated.



REFERENCES

Byrne, P. et al. (2009), Design and simulation of a heat pump for simultaneous heating and cooling using HFC or CO₂ as a working fluid.

DM Sviluppo economico 26 giugno 2015, “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”.

EPBD recast, (2010), Directive 2010/31/EU, Energy Performance of Building Directive Recast.

Klein SA, et al. (2010), TRNSYS 17: A Transient System Simulation.

New EPBD, (2018) Directive 2018/844/EU, Energy Performance of Building Directive 2nd Recast.

ISO, (2005). ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

NTM 011/2 (2014). Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico. Anteproyecto de norma

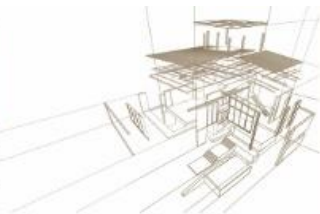
NTM 011/3 (2014). Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Calidad del aire interior. Anteproyecto de norma.

NCh853 (2007). Acondicionamiento térmico – Envoltura térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas. Norma Chilena.

Payam, N. et al. (2014), A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector.

Tricallotis, M. et al. (2018), The impacts of forest certification for Chilean forestry businesses.

UNI (2014), UNI/TS 11300-1. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale



SOLUCIONES PARA AISLACIÓN TÉRMICA Y ACÚSTICA DE UN EDIFICIO DE VIVIENDA SOCIAL EN CLT

SOLUTIONS FOR THERMAL AND ACOUSTICS INSULATION OF A SOCIAL HOUSING BUILDING IN CLT

Burgos, Camila ⁽¹⁾*; González, Paulina ⁽²⁾; Pérez, Eduardo ⁽³⁾.

⁽¹⁾ Dra. Arq., Facultad Tecnológica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

⁽²⁾ Ing. Civil, Mag. Ing. Sismica, Facultad Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

⁽³⁾ Ing. Civil Industrial, Facultad Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

* Contacto: camila.burgos.l@usach.cl

Resumen

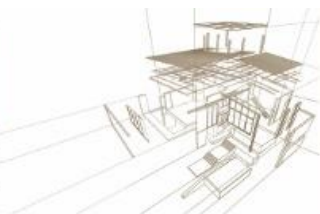
En este trabajo se realiza el estudio del comportamiento térmico y acústico de un edificio de vivienda social de cuatro pisos, estructurado en base al sistema constructivo en madera contralaminada (CLT), y se proponen soluciones que permiten satisfacer las disposiciones de la normativa actual en tres zonas climáticas de Chile. En lo que se refiere al fenómeno acústico, las exigencias son las mismas para cualquier lugar del país y se deben aplicar, principalmente en este caso, a la transmisión de los ruidos aéreos y de aquellos generados por impacto. Los resultados del estudio indican que es necesario emplear elementos de aislación acústica debido a que los elementos de CLT no son suficientes para satisfacer los requisitos normativos. En cambio, en el caso de las exigencias térmicas, que son diferentes para cada zona climática, el CLT resulta suficiente. Este resultado favorable es además incrementado porque las soluciones que se deben emplear en la propuesta de aislación acústica producen un aumento de la resistencia térmica de la envolvente, con lo cual se generan ahorros de energía y mejoras en las condiciones de confort higrotérmico de las viviendas de CLT.

Palabras-clave: edificios de CLT, eficiencia energética, soluciones térmico-acústicas

Abstract

In this work a study of thermal and acoustics behaviour is done in a four stories social housing building, structured on basis to cross laminated timber (CLT). Solutions are proposed that can satisfy regulations of actual code in three climate zones of Chile. With reference to acoustics subject, demands are the same for any place in the country and must be applied, mainly in this case, aerial transmission and those generated by impact. Results of study show that it is necessary to use acoustics insulation elements as the CLT elements are not enough to satisfy code requests. However, in case of thermal requests, which are different for each climate zone, CLT is enough. This favourable result is also increased because solutions that must be used in proposal of acoustics insulation produce an increase of thermal resistance of the envelope, with which there are energy savings and improves hygrothermal comfort conditions of CLT housings.

Keywords: CLT buildings, energy efficiency, thermal-acoustics solutions.



1. INTRODUCCIÓN

En Chile las edificaciones de uso habitacional deben tener un buen estándar de aislación térmica y acústica (OGUC, 2016) debido a la importancia que ha adquirido la necesidad de mejorar en forma eficiente, desde el punto de vista energético, las condiciones de habitabilidad de las viviendas. La eficiencia energética adquiere mayor relevancia debido a que los presupuestos en estos casos son más acotados.

Para mejorar el bienestar higrotérmico de la vivienda, la normativa del año 2016 tiene como objetivo mejorar las condiciones de bienestar térmico del usuario debido a la necesidad de protección del medio externo, además de lograr condiciones medioambientales en el interior de la vivienda con mejor calidad de aire y menor humedad. Estos cambios también están orientados a ahorrar energía tanto en la etapa de la construcción como a lo largo de la vida útil de la edificación y así contribuir al cuidado del medio ambiente.

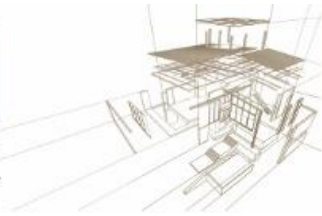
La envolvente de la vivienda está compuesta por muros, techumbre y piso, además de cualquier elemento que separe ambientes de distintas temperaturas. Al respecto, el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC, 2016), establece que todas las viviendas deben cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico siguientes: i) aislación de techos; ii) aislación de muros, ventanas y pisos; iii) certificación térmica. La normativa chilena vigente establece valores máximos de la transmitancia térmica (U) para la envolvente de las viviendas (NCh 1079 of 2008) en cada una de sus zonificaciones climáticas. Estos valores pueden tener como consecuencia la reducción de requerimientos de calefacción en más de un 50% en la zona central del país; en la zona norte interior es posible que los requerimientos de calefacción sean nulos y, en la zona sur, la demanda de calefacción puede reducirse a un tercio de la que existe actualmente en las viviendas sociales.

Las viviendas en su mayoría son construidas con materiales tradicionales, tales como albañilería y hormigón armado, que requieren un mayor costo de energía para materializarlas en comparación a la madera.

Tanto en Europa como América del Norte se está utilizando CLT (Cross Laminated Timber), debido a las cualidades que posee asociadas a la arquitectura, a su resistencia estructural y sísmica y que se comporta de manera favorable en la aislación tanto térmica como acústica, lo cual aumenta el confort de los habitantes y reduce los gastos energéticos en los sistemas de calefacción, favoreciendo la reducción de CO₂ de la atmósfera.

La disminución del tiempo total de construcción con este nuevo sistema se estima en un 30%, por efectos de tiempos de fraguado entre otros, y que tendría como resultado un aumento de productividad y ahorro de un 30% del costo de construcción. Aproximadamente los costos de construcción corresponden al 35% del valor del departamento.

Con este sistema constructivo se puede desarrollar una construcción limpia, rápida y con aislación térmica acústica, que permite mantener el calor en invierno y el frescor en verano; por lo tanto se producen ahorros en climatización tanto en invierno como en verano.



2. PROYECTO EDIFICIO DE VIVIENDA SOCIAL DE MEDIANA ALTURA EN CLT

El edificio cuenta con 4 pisos, con una altura de 2,40 metros de piso a cielo en cada departamento, siendo la altura total de la edificación de 10,70 metros. Al incluir los paneles de coronación sobre la cubierta, se alcanza una altura de 11,90 metros.

La fachada está compuesta por paneles de diferentes colores intercalados utilizando tres tonalidades de stain (lasur), el cual es un impregnante a poro abierto (González et al 2014).



Figura 1: Isométrica del proyecto de edificio en CLT. (González et al, 2014)

En la planta tipo de arquitectura de la Figura 2 se muestra la distribución de los distintos recintos que posee, la cual está en concordancia con lo que señala la legalidad chilena vigente (Decreto supremo chileno N° 49 del 2011). Los muros poseen un espesor de 0,12 m. mientras que los paneles que componen las losas tienen un espesor de 0,22 m.



Figura 2: Planta tipo del 1 al 4 piso. (González et al, 2014)



La configuración completa de la edificación se realiza con los formatos de paneles que se especifican en la Tabla 1.

*Tabla 1: Descripción de paneles de CLT y su ubicación en el proyecto de edificio.
(Albornoz y Barrera, 2016)*

PANELES DEL 1° A 4° PISO	
Paneles	Paneles de CLT de 0.12 m de espesor, 1.2 m de ancho y 2.4 m de largo.
½ Panel	Panel de CLT de 0.12 m de espesor, 0.6 m de ancho y 2.4 m de largo.
Panel de ventana	Panel de CLT de 0.12 m de espesor, 1.2 m de ancho y 1 m de largo.
Panel de dintel	Panel de CLT de 0.12 m de espesor, 1.2 m de ancho y 0.4 m de largo.
Panel de ajuste	Panel de CLT usado en ejes estructurales para completar largos, dimensiones variables.

3. ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA A ESTUDIAR

En la Normativa vigente (NCh 1079 Of.2008) se identifican cada una de las zonas climáticas del país con su descripción y exigencias.

La elección de las zonas climáticas para este estudio (norte litoral, central interior y sur interior), está basado en la cantidad de población en cada una de ellas y su posibilidad de expansión. No se incluye el sur extremo porque en esa zona se requiere mayor aislación térmica debido a las bajas temperaturas que se presentan.

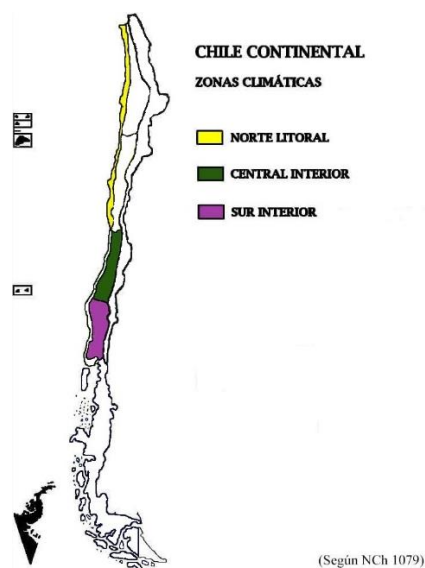
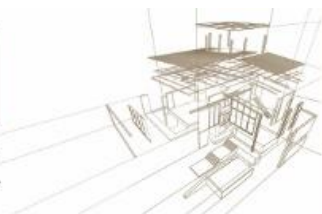


Figura 3: Zonas climáticas elegidas. (NCh 1079 Of.2008)



- Norte Litoral: Es una zona desértica, con clima dominante marítimo y poca oscilación de temperatura diaria. Nubosidad y humedad en las mañanas, soleamiento fuerte en las tardes y lluvias nulas en su extremo norte y poco frecuentes en el sur. Posee viento proveniente del Sur y Sur-Oeste.
- Central Interior: Posee un clima mediterráneo con temperaturas templadas e inviernos de 4 a 5 meses, una vegetación normal y lluvias en aumento hacia el sur. Una insolación intensa en verano y una oscilación de temperatura diaria moderada, aumentando hacia el Este. Presenta un viento proveniente del Sur-Oeste.
- Sur Interior: Es una zona lluviosa y fría con heladas. Posee veranos de 4 meses aproximadamente con una insolación moderada, además de varios ríos y lagos, con sus propios microclimas. Una vegetación robusta y un ambiente y suelo húmedos. Vientos de componentes Sur.

4. AISLACIÓN TÉRMICA EN EDIFICIO DE CLT

La reglamentación térmica actual chilena es bastante exigente para imponer requisitos que permitan generar condiciones medioambientales en el interior de las viviendas con adecuada calidad de aire y con baja humedad, para lograr bienestar y buena calidad de vida de los habitantes, además del ahorro de energía que esto conlleva.

El acondicionamiento térmico de los elementos constructivos de la envolvente es un factor fundamental para la habitabilidad de un edificio residencial, logrando mayor calidad y eficiencia energética, lo que significa un avance tecnológico para el país en materia de energía y cuidado con el medio ambiente.

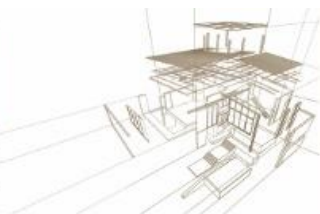
La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción chilena (OGUC) en su actualización de marzo del año 2016, establece en su artículo 4.1.10 que todas las viviendas deberán cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico de aislamiento de techos, muros, ventanas y piso, además de una certificación térmica.

Las recomendaciones que contiene la normativa chilena, incluye valores de transmitancia térmica para la envolvente, además de aquellos valores de la pendiente que deben cumplir las cubiertas así como recomendaciones sobre protecciones y calefacción.

En la Tabla 2 se muestran tres zonas climáticas con las respectivas exigencias del valor máximo de U (transmitancia térmica) para techumbre, muro, piso ventilado y ventana.

Tabla 2: Valores de Transmitancia térmica para 3 zonas climáticas. (OGUC, 2016)

Zona Climática	Valores máximos Transmitancia térmica U w/m ² k			
	Techumbre	Muro	Piso Ventilados	Ventana
Norte Litoral (NL)	0,80	2,00	3,00	5,80
Central Interior (CI)	0,50	0,80	0,80	3,00
Sur Interior (SI)	0,30	0,50	0,70	3,00



En la Tabla 3 se detallan los valores de transmitancia térmica de los paneles de CLT de 120 mm en muros y de 220 mm en techumbre y piso, utilizados en el proyecto que se analiza en este trabajo.

De la comparación de estos resultados con los valores de la Tabla 2, se concluye que los elementos de CLT del edificio satisfacen los requisitos normativos en las tres zonas climáticas.

Tabla 3: Valores de Transmitancia térmica para los elementos de CLT. (FPInnovations 2011)

Panel CLT sin acabado y sin elementos adicionales		
Tipo Elemento	Espesor (mm)	U (w/m ² k)
Muro	120	0,79
Techumbre	220	0,43
Piso	220	0,43

5. AISLACIÓN ACÚSTICA EN EDIFICIO DE CLT

Los edificios en Chile, particularmente aquellos de vivienda social, cuentan actualmente con un estándar bastante deficiente en lo referido a la aislación acústica. Los ruidos que más afectan al interior de las viviendas son los producidos en el ambiente exterior, así como en las viviendas colindantes. La reverberación y la absorción acústica de la superficie interior de cada una de las soluciones constructivas se puede controlar con el grado de absorción de las superficies interiores.

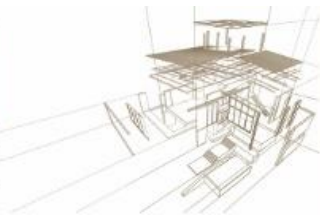
El problema del ruido de impacto debe principalmente a los muros medianeros y las losas, los cuales suelen comportarse de forma deficiente (Burgos 2016).

La transmisión del sonido entre las dependencias de un edificio residencial o comercial, así como del exterior hacia el interior, cumple un rol importante en el nivel de comodidad de sus ocupantes. Por lo tanto, la aislación acústica debe ser una prioridad durante la etapa de planificación de la obra.

En la Tabla 4 se presenta la reducción acústica mínima exigida para muro (aéreo) y pisos (aéreo y de impacto), según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC 2016).

Tabla 4: Valores de Reducción acústica para 3 zonas climáticas. (OGUC, 2016)

Zona Climática	Reducción Acústica		
	Muro	Pisos	
	Aéreo (db)	Aéreo (db)	Impacto (db)
Norte Litoral (NL)	45	45	75
Central Interior (CI)	45	45	75
Sur Interior (SI)	45	45	75



Los parámetros que inciden significativamente en la capacidad de aislación de ruidos, en pisos y muros, son la masa y el amortiguamiento de los elementos constructivos. El espesor de los muros, en el caso del CLT, es uno de los factores más importantes que influye en la efectividad del sistema de aislación acústica, mientras mayor es el espesor mayor es la capacidad de aislación. Los ensayos de laboratorio que reporta la literatura sobre el tema (FP Innovations 2011) indican que los pisos expuestos de CLT tienen un coeficiente de amortiguamiento crítico de aproximadamente 1%; por lo tanto, en la mayoría de los casos se propone agregar otros materiales para que el sistema mejore su eficiencia en cuanto a la aislación acústica.

Como se aprecia en la Tabla 5, el proyecto analizado no cumple con las exigencias normativas chilenas de reducción acústica.

Tabla 5: Valores de Reducción acústica de los paneles de CLT. (FPInnovations 2011)

Tipo Elemento	Reducción acústica (4)	
	Aéreo db	Impacto db
Muro	39	23
Techumbre	39	24
Piso	39	24

6. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TÉRMICO – ACÚSTICA PARA EDIFICIO CLT

Los paneles de CLT del edificio analizado cumplen con los requisitos de aislación térmica pero no satisfacen las exigencias de aislación acústica que prescribe la normativa vigente; para dar solución a este problema, se recomiendan las siguientes soluciones constructivas que permiten aumentar su capacidad de aislación térmica y acústica.

- a) **Solución para muro perimetral:** se recomienda instalar una placa de yeso cartón de 12,5mm en la cara interior del muro de tal manera de generar una cámara de aire con listones de madera aserrada para aumentar la resistencia acústica y a su vez aumentar las propiedades térmicas, cumpliendo de esta forma con la normativa actual.

$U = 0,43 \text{ w/m}^2\text{k}$
Rw Aéreo = 48 db
Rw impacto = No aplica

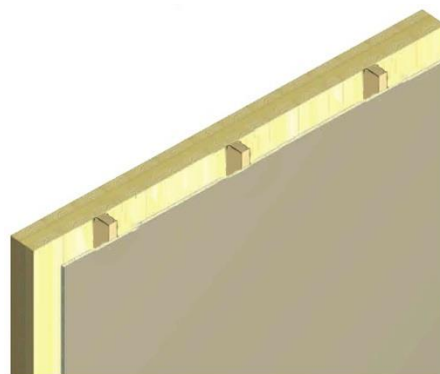


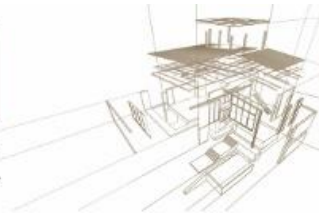
Figura 4: Solución muro perimetral. (Herrera y Llanquileo, 2016)



CLEM

2019

18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

- b) **Solución de Techumbre:** se propone instalar papel fieltro sobre el panel de CLT y luego la cubierta de zinc tipo 5v (se recomienda este tipo de plancha o similar para que sea transitable). Bajo el panel de CLT se instala un colchón de lana mineral de 50mm y, con perfiles metálicos colgados del CLT, se construye la estructura que recibe finalmente la placa de yeso cartón de 12,5mm que se utiliza como cielo interior; de esta manera se genera una cámara de aire para aumentar la resistencia acústica y a su vez aumentar las propiedades térmicas, cumpliendo así con la normativa actual.

$$U = 0,27 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$Rw \text{ Aéreo} = 56 \text{ db}$$

$$Rw \text{ impacto} = \text{No aplica}$$

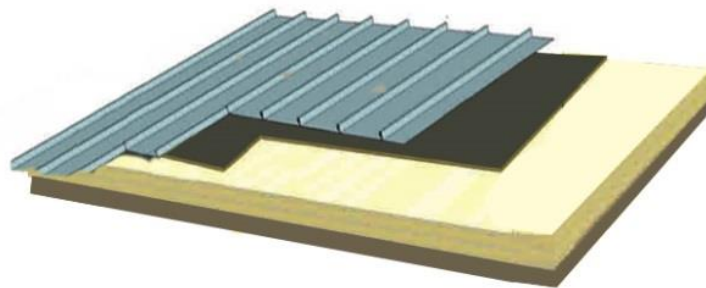


Figura 5: Solución de techumbre. (Herrera y Llanquileo, 2016)

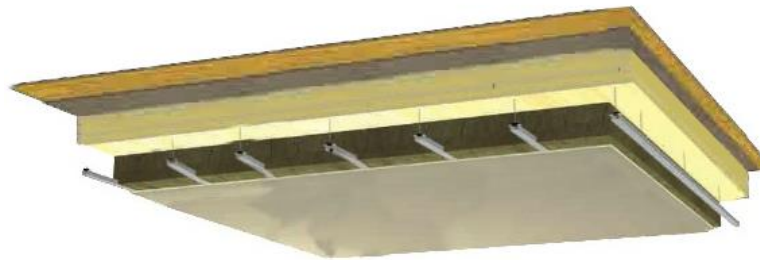


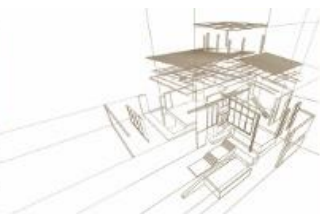
Figura 6: Solución de techumbre. (Herrera y Llanquileo, 2016)

- c) **Solución de Piso:** se propone instalar sobre el panel de CLT de 220 mm una espuma niveladora más un piso de corcho HRF de 10,5 mm de espesor. Bajo el panel de CLT se instala lana mineral con papel en una cara de 200mm y, con perfiles metálicos colgados del CLT, se construye la estructura que recibe finalmente la placa de yeso cartón de 12,5mm que se utiliza como cielo interior; de esta manera se genera una cámara de aire para aumentar la resistencia acústica y a su vez aumentar las propiedades térmicas, cumpliendo así con la normativa actual.

$$U = \text{No aplica}$$

$$Rw \text{ Aéreo} = 79 \text{ db}$$

$$Rw \text{ impacto} = 75 \text{ db}$$



7. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado soluciones constructivas para aumentar la capacidad de aislación térmica y acústica de un proyecto de edificio de mediana altura en madera contralaminada. Estas soluciones generan aumento en la resistencia térmica de la envolvente, lo que se traduce en un incremento de ahorro energético y condiciones de confort higrotérmico. La utilización de materiales que generen soluciones arquitectónicas y constructivas que proporcionen mejores condiciones de habitabilidad se traducen en menores consumos de energía en el tiempo y menor impacto ambiental, permitiendo menores costos de mantenimiento de la vivienda.

Del estudio se concluye que el CLT satisface los requisitos de aislación térmica, pero no ocurre lo mismo en el aspecto acústico, debiéndose incorporar elementos constructivos para reducir la transmisión de los ruidos aéreos y los ruidos de impacto.

Es importante señalar que se deben verificar diferentes espesores de elementos de CLT para optimizar su comportamiento térmico y acústico, tanto en muros como en losas; este sistema constructivo disipa el calor de tal forma que el calor del muro penetra y se expulsa de forma inteligente, dependiendo de su calor específico y conductividad térmica.

Finalmente, es posible afirmar que el sistema constructivo en madera contralaminada satisface los requisitos de aislación térmica, además de aportar a la sustentabilidad en el área de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo financiero de Innova CORFO a través del proyecto *15BPE-47270 Ingeniería sismorresistente para diseño estructural de edificios de mediana altura en madera contralaminada de pino radiata crecido en Chile*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albornoz, I. y Barrera, M. (2016). Estudio de costos de fabricación de paneles CLT para la construcción de edificios de mediana altura. Memoria de título de Constructor Civil, Universidad de Santiago de Chile.

Burgos, C. (2016). Análisis del comportamiento de las fachadas de madera en zonas con clima mediterráneo. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona - España.

Carrillo, C. y Salas, F. (2016). Evaluación del comportamiento térmico mediante programa computacional Design Builder para un edificio de mediana altura construido en sistema CLT. Memoria de título de Constructor Civil, Universidad de Santiago de Chile.

FPInnovations (2011). CLT Handbook. Canadian Edition. Quebec. Canadá.

González, A. (2012). Evaluación de herramientas de simulación energética: Estudio del caso de la determinación de la demanda de calefacción en las viviendas de Concepción. Memoria de título de Magister en Habitat Sustentable. Universidad del Bio Bio.



González, P., Saavedra, E., Pérez, E., Burgos, C., Piña, F. y Wagner, M. (2014). Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios, ISBN: 978-956-303-267-3. Universidad de Santiago de Chile, www.conmaderausach.cl.

González, P., Burgos, C., Pérez, E., Valdivieso, D., Saavedra, E., Yáñez, S. y Wagner, M. (2019). Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Volumen 2, ISBN: 978-956-303-395-3. Universidad de Santiago de Chile, www.conmaderausach.cl.

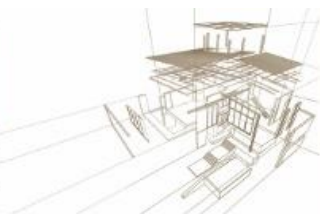
Herrera, A. y Llanquileo, N. (2016). Proposición de un sistema de aislación térmica y acústica para edificios de mediana altura en un sistema CLT, en tres zonas climáticas de Chile. Memoria de título de Constructor Civil, Universidad de Santiago de Chile.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2008): NCh 1079 of 2008: Arquitectura y construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2014): NCh 853.of 2014: Componentes y elementos para la edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Método de cálculo. Consultado el 28 de abril de 2014.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2007): NCh 853 of. 2007: Acondicionamiento térmico-envolvente para edificios.

MINVU (Ministerio de la Vivienda y Urbanismo). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones OGUC. 2016



EVALUACIÓN DE LA REPLICABILIDAD Y COMPETITIVIDAD DE UNA VIVIENDA INDUSTRIALIZADA EN MADERA EN CHILE

EVALUATION OF THE REPLICABILITY AND COMPETITIVENESS OF AN INDUSTRIALIZED WOOD HOUSE IN CHILE

Cid, Allan ⁽¹⁾ *; Mazzachiodi, Macarena ⁽²⁾; Victorero, Felipe ⁽³⁾

⁽¹⁾ Candidato a Doctor. Université Laval. Québec, Canadá

⁽²⁾ Ing. Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

⁽³⁾ Subdirector de Transferencia. Centro UC de Innovación en Madera, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

* Contacto: allan.cid-olivares.1@ulaval.ca

Resumen

Se presenta una evaluación de la replicabilidad de la vivienda industrializada del Barrio Eco-Sustentable Chañaral, proyecto desarrollado como respuesta rápida y efectiva para la reconstrucción de la localidad de Chañaral, ubicada en el norte de Chile. La replicación de este proyecto se evalúa en Antofagasta, Santiago y Concepción, con el fin de determinar y cuantificar los costos y beneficios asociados a la construcción de viviendas industrializadas de madera. Se calculan los costos de construcción, operación y demolición de una vivienda de madera y se comparan con los de una vivienda caso base, que es definida como una vivienda ponderada de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado, según las proporciones de uso de cada material en cada ciudad estudiada. El presente artículo presenta el análisis estratégico del proyecto en el que se calculan los costos por metro cuadrado con el objetivo de extrapolar dichos resultados a proyectos de distintas dimensiones. El análisis de los costos determinó que el factor más importante del proyecto es la inversión inicial (costo de construcción) ya que representa aproximadamente el 90% de los costos totales de los proyectos. En cuanto a los beneficios asociados, el menor gasto en calefacción es el de mayor impacto económico. Otro beneficio asociado que puede ser importante es el menor tiempo de construcción. En una situación de emergencia, por ejemplo, se torna relevante pues las familias afectadas reciben sus viviendas definitivas de forma más rápida.

Palabras-clave: construcción industrializada en madera, LCCA, competitividad.

Abstract

An evaluation of the replicability of the industrialized housing solution used at the Chañaral Eco-Sustainable Neighborhood is presented. This project was developed as a rapid and effective response for the reconstruction of the locality of Chañaral, in northern Chile. The replication of this project is evaluated in Antofagasta, Santiago and Concepción, in order to determine and quantify the costs and benefits associated with the construction of industrialized wood houses. The costs of construction, operation and demolition of a wooden house are calculated and compared with those of a base case house, which is defined as a house made in different proportions in masonry, concrete blocks and reinforced concrete, according to the usage of those materials in each studied city. This article presents the strategic analysis of the project in which the costs per square meter are calculated with the aim of extrapolating these results to projects of different dimensions. The analysis of the costs determined that the most important factor of the project is the initial investment (construction cost) since it represents approximately 90% of the total costs of the projects. In terms of the associated benefits, the lower expenditure on heating has the most economic impact. Other important associated benefit can be the shortest construction time. In an emergency, for example, it becomes relevant because the affected families would receive their definitive homes faster.

Keywords: timber offsite construction, LCCA, competitiveness.



1. INTRODUCCIÓN

Se evalúa la replicabilidad y competitividad de una vivienda industrializada diseñada por el Centro de Innovación de Madera UC (CIM), las que fueron construida en Chañaral y El Salado entre 2017 y 2018. Para este fin, se realizará una comparación y análisis multivariable de las distintas materialidades utilizadas en la construcción de viviendas sociales en Chile.

Se estudia la replicabilidad en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción. Esta selección fue realizada porque estas ciudades son representativas de las diferentes zonas térmicas y sísmicas del país, además de ser las ciudades con la mayor población de las zonas norte, centro y sur del país (Censo 2002).

Tabla 1: Porcentaje de la población de las zonas norte, centro y sur del país que habitan en Antofagasta, Concepción y Santiago. Fuente: Censo 2002, CASEN 2013

Ciudad	Población	% Representatividad	Zona sísmica	Zona térmica
Antofagasta (Norte)	318.779	42%	3	1
Santiago (Centro)	4.668.473	65%	2	3
Concepción (Sur)	912.889	46%	3	4

El caso base corresponde a viviendas sociales que se construirían en lugar del proyecto desarrollado por el CIM. La metodología de la estimación del caso base varía para cada ciudad dependiendo de la distribución de las materialidades y la variación de los costos intrínsecos de construcción para cada materialidad. Para todos los casos se utilizaron datos de costo de viviendas construidas entre 2012 y 2015, considerando la proporción de materiales utilizados para la construcción de viviendas sociales en cada ciudad (Censo 2002 y CASEN 2013), las que se detallan en la Figura 1.

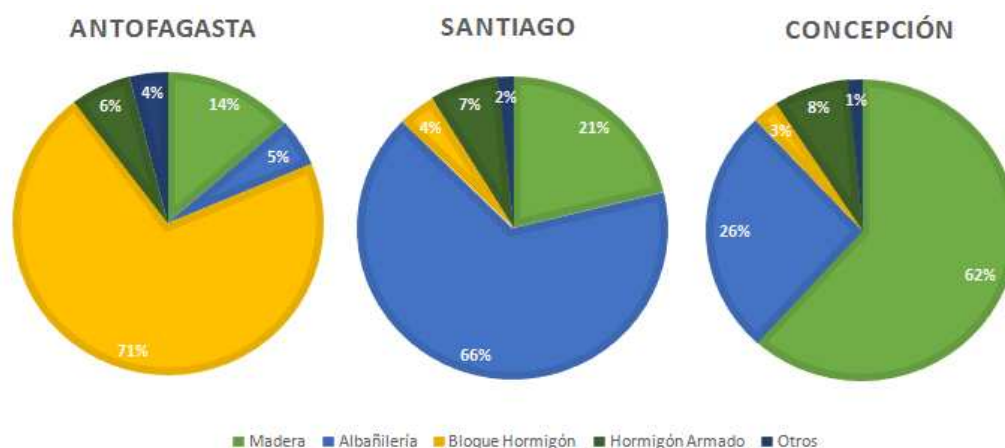
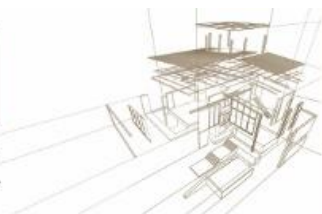


Figura 1: Porcentajes de viviendas sociales construidos de madera, albañilería de ladrillos, bloques de hormigón, hormigón armado y otros, en Antofagasta, Santiago y Concepción. Fuente: Censo 2002, CASEN 2013



2. METODOLOGÍA

El cálculo de los costos de las viviendas se realiza de acuerdo con su ciclo de vida, considerando las etapas de construcción, operación y demolición. Dentro de cada etapa, se considera tanto el costo de efectuar la construcción, operación y demolición, agregando el costo equivalente de la huella de carbono de cada etapa. A la etapa de construcción se le añade la diferencia de costo por tiempo de construcción (ver Figura 2).

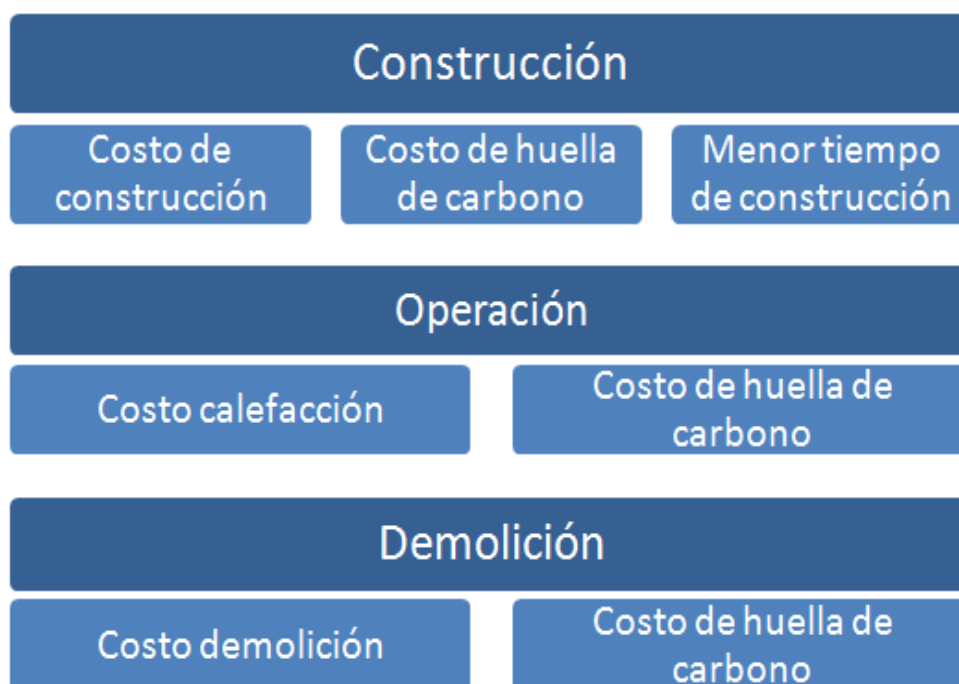


Figura 2: Resumen de las categorías de los costos del proyecto en las distintas etapas.

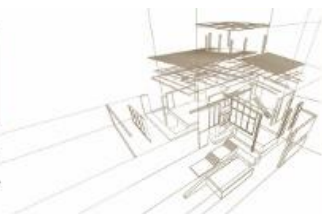
2.1. Costos asociados al proceso de construcción

2.1.1. Costo de construcción

La metodología para calcular los costos de construcción del caso base varía en cada zona, la cual se detalla a continuación:

Antofagasta: Para el caso base, se utiliza un valor tabla del MINVU (Municipalidad de Antofagasta, 2015). Los costos por vivienda social promedio son de 1.200 UF, con una superficie promedio de 55,9 metros cuadrados. Para los costos del proyecto en madera se usaron los costos del Barrio Eco-Sustentable Chañaral.

Santiago: Para calcular los costos de construcción del caso base se utiliza el valor del promedio ponderado de las licitaciones recopiladas. Se opta por esta metodología porque existe evidencia estadística de una relación significativa el costo por metro cuadrado. Para la estimación del costo del proyecto en madera, se obtiene haciendo un paralelo con el valor del percentil en el que se ubica respecto al proyecto en Concepción.



Concepción: En este caso, se logra establecer una clara relación entre el costo por metro cuadrado, el costo total del proyecto y la cantidad de viviendas por lote, la cual es estadísticamente válida. Para el cálculo de la alternativa se consideraron los costos de un proyecto hecho en madera asesorado por el CIM en una zona cercana.

2.1.2. Huella de carbono de la construcción

El cálculo de la huella de carbono de la construcción considera el peso de los materiales de cada solución constructiva y su respectivo factor de emisión de CO₂, según la siguiente expresión:

$$kg_{CO_2eq} = FE * m \quad (1)$$

donde:

- kg_{CO_2eq} es la masa de CO₂ equivalente en kilogramos,
- FE es el factor de emisión,
- m es la masa del material, en kilogramos.

La cantidad de material para cada vivienda se obtiene a partir del programa *Design Builder*. Los factores de emisión se obtienen de las empresas chilenas productoras y los valores publicados en Inventory of Carbon & Energy V1.6a (Hammond, 2008).

El cálculo del costo de la huella de carbono se realiza a través de los costos sociales asociados a las emisiones de CO₂, que se calculan con el impuesto de US\$ 5 por tonelada emitida de CO₂, valor vigente en Chile a partir del año 2017.

2.1.3. Beneficio social asociado a un menor tiempo de construcción

Construir un proyecto en madera requiere menos de la mitad del tiempo que los materiales tradicionales (Lehmann, 2013), lo que implica que los beneficiarios se encuentran un menor tiempo en condiciones habitacionales insuficientes. Esto significa un beneficio social que se cuantifica a través del subsidio arriendo que otorga el Estado de Chile (MINVU, 2015), el cual consiste en un subsidio de 3 UF mensuales por familia. Dicho subsidio será descontado a una tasa mensual de 0,49%.

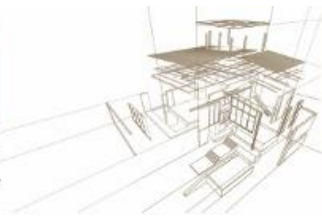
Para efectos de comparación se considera un período de construcción de 8 meses para el proyecto de madera y de 16 meses para el caso base.

2.2. Operación

2.2.1. Costos de calefacción

Los costos de calefacción se calculan considerando la demanda anual por calefacción para cada tipo de vivienda y ciudad. Luego, se calcula el precio de la energía por kWh para obtener el monto anual gastado en calefacción.

Se realizó una simulación utilizando un modelo de la vivienda desarrollada por CIM en el software *Design Builder* (Figura 3). Se modifica la materialidad de cada elemento para realizar una comparación entre materialidades.



El software calcula la energía necesaria para alcanzar la temperatura interior de confort, utilizando para esto las variables climáticas de la ciudad y la estructura de la vivienda. Se utiliza el diseño de las viviendas del Barrio Eco-Sustentable Chañaral y se modela el desempeño energético de una vivienda construida en madera, albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado.

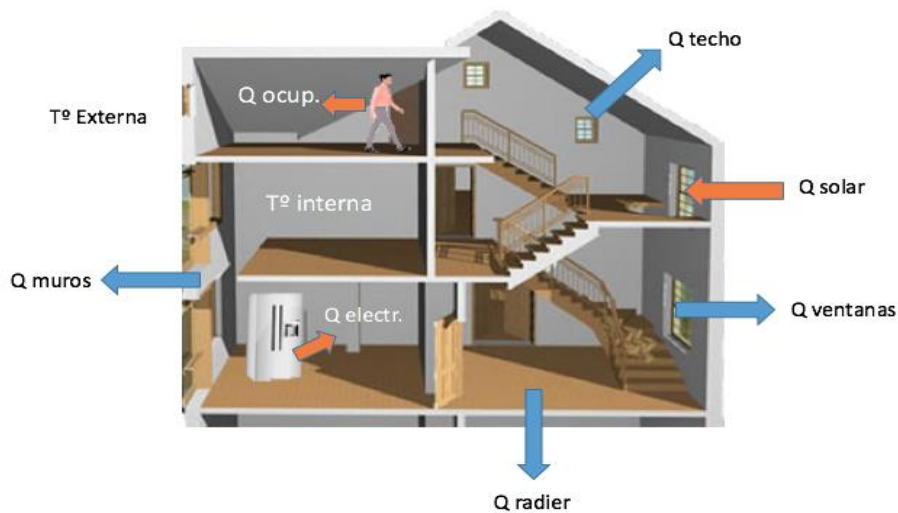


Figura 3: Modelo de flujos de calor (ganancias y pérdidas).

Las características de estas viviendas, i.e. los factores de pérdidas (Tabla 2) y de ganancias (Tabla 3) se establecen a partir de las soluciones constructivas del MINVU definidas para cada zona térmica.

Tabla 2: Factores de pérdida utilizados en la simulación: factores de transmitancia (factores U) para los muros, techos y fundación de las viviendas de cada material y factores de ganancia por ocupación y electrodomésticos para las cuatro ciudades, según zona térmica. Valores en W/m^2K .

			Antofagasta	Santiago	Concepción
			2,00	3,00	4,00
Pérdida de calor	Muros	Madera	0,37	0,37	0,37
		Albañilería	1,30	1,30	1,30
		Bloques hormigón	1,60	1,30	1,30
		Hormigón armado	1,80	1,80	1,50
	Techo de madera c/ poliestireno		0,29		
	Ventanas (vidrio e=3mm)		5,90		
	Piso de hormigón armado		1,50		

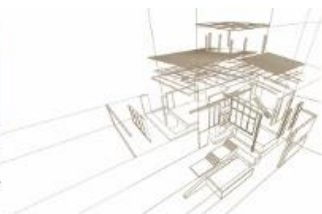


Tabla 3: Factores de ganancia utilizados en la simulación: factores de transmitancia (factores U) para los muros, techos y fundación de las viviendas de cada material y factores de ganancia por ocupación y electrodomésticos para las cuatro ciudades, según zona térmica.

Ganancia de calor	Ganancias por electrodomésticos	6,400 W/m ²
	Ganancias por ocupación	0,023 W/persona

Se define la temperatura de confort para todas las viviendas en 20 °C (CIBSE) y se considera el uso de la calefacción solamente entre las 06:00 y 22:00 horas.

2.2.2. Cálculo de costo anual de calefacción

Se considera la calefacción de una estufa a parafina y a leña dado que son los combustibles de menor costo por kWh y los métodos de calefacción más utilizados (CADEM,2014). Los tipos de combustible y sus respectivos precios por kWh en Antofagasta, Santiago y Concepción se encuentran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4: Tipo de combustibles considerado y los precios por kWh de los combustibles para Antofagasta, Santiago y Concepción.

	Tipo de combustible	Precio
Antofagasta	Parafina	57,1 CLP/kWh
Santiago	Parafina	57,0 CLP/kWh
Concepción	Parafina	58,0 CLP/kWh
	Leña	23,6 CLP/kWh

El consumo anual de energía por vivienda (en kWh) se multiplica por los precios por kWh de la parafina y leña para las distintas ciudades y se obtienen los precios anuales de la calefacción por vivienda.

Los costos de calefacción del caso base se obtienen a partir de la ponderación según el material de construcción utilizado para cada región.

2.3. Huella de carbono de la operación

La emisión de CO₂ de la operación es generada por las estufas de leña y parafina. El cálculo de las emisiones de CO₂ se realiza a través de un factor de emisión (kgCO₂/kWh) para ambos combustibles que se multiplica por la cantidad de kWh generadas por las estufas.

Como se mencionó anteriormente se considera el uso de una estufa de parafina en Antofagasta y Santiago, mientras que en Concepción se considera el uso ponderado de ambas estufas (parafina y leña, Tabla 5).

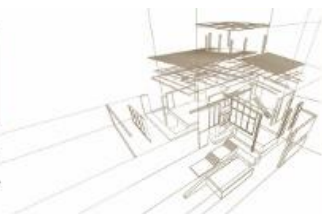


Tabla 5: Factores de emisión de CO₂ para la combustión de parafina y de leña.

	Parafina	Leña
Factor de emisión (kgCO ₂ /kWh)	0,26	0,4

2.4. Demolición

2.4.1. Costo de demolición

El costo de demolición se calcula con los valores de la demolición de suelos por m² y demolición de muros por m³ para los cuatro materiales de construcción (ver Tabla 6).

Tabla 6: Costos unitarios de demolición por m² de superficie y m³ de muros de una vivienda de madera, albañilería de ladrillos, bloques de hormigón y hormigón armado (CYPE, Ingenieros).

Costos unitarios	Madera	Albañilería de ladrillos	Bloques hormigón	Hormigón armado
Costo demolición de suelos (UF/ m ²)	0,18	0,50	0,50	0,50
Costo demolición de muros (UF/m ³)	0,21	0,46	0,97	1,75

Para obtener el costo de demolición por vivienda se multiplican los costos unitarios por la superficie y la cantidad de m³ de muro de las viviendas, y se obtienen los costos de la demolición para cada una de las viviendas en las distintas ciudades.

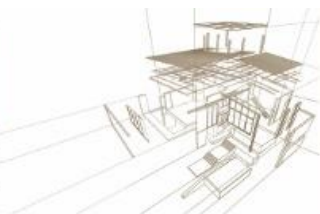
Finalmente, se ponderan los costos de la demolición de la vivienda de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado para obtener el costo de demolición del caso base. Los valores se dividen por la superficie de la vivienda (55,9 m²) y se obtienen los costos por m² de la vivienda de madera y del caso base.

2.4.2. Huella de carbono de la demolición

La huella de carbono de la demolición para el proyecto de madera y las alternativas de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado se calculan usando la misma metodología que en el cálculo de la huella de carbono de la construcción. Se obtuvo que el factor de emisiones por kilogramo de demolición varía entre 0,004 y 0,01 kg CO₂/kg material (Nielsen, 2008). Para hacer una aproximación conservadora se utiliza el valor de 0,01 kilogramos de CO₂ por kilogramos de demolición. El peso del edificio a ser demolido se obtiene de los cálculos del software *Design Builder* (Tabla 7).

Tabla 7: Peso de material de una vivienda de madera y caso base, y la emisión de CO₂ de la demolición de una vivienda.

	Antofagasta		Santiago		Concepción	
	Madera	Caso Base	Madera	Caso Base	Madera	Caso Base
Peso total (kg)	21.934	28.006,6	21.934	26.507,6	21.934	26.447,8
Emisión CO ₂ (kg)	219,3	280,1	219,3	265,1	219,31	264,5



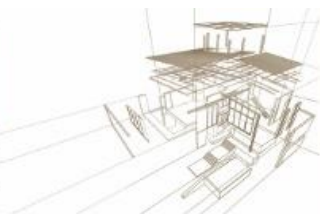
3. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos (ver Tabla 8), se puede observar que el mayor impacto en los costos totales se debe a la construcción de los proyectos, ya que constituyen aproximadamente el 90% de estos. Por esta razón es que los beneficios sociales asociados a la construcción en madera sólo se tornan importantes económicamente cuando los costos de construcción de los proyectos son similares.

Las ventajas sociales del proyecto madera son mayores a las del caso base, ya que se tiene un menor consumo de calefacción, una menor huella de carbono y un menor tiempo de construcción en todas las ciudades en donde se realizó el análisis de replicabilidad.

Tabla 8: Flujos de costos descontados (UF/m²).

Resumen costos en UF/m ²							
Etapas		Antofagasta		Santiago		Concepción	
		Proyecto madera	Caso base	Proyecto madera	Caso base	Proyecto madera	Caso base
Construcción	Costo de construcción (UF/m ²)	19,51	21,82	18,8	16,48	16,42	15,7
	Huella carbono construcción (UF/m ²)	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
	Tiempo de construcción (UF/m ²)	0,42	0,78	0,42	0,78	0,42	0,78
Operación	Calefacción (UF/m ²)	0,34	0,61	2,73	3,46	0,64	0,88
	Huella carbono operación (UF/m ²)	0,00	0,01	0,04	0,04	0,05	0,07
Demolición	Demolición (UF/m ²)	0,03	0,09	0,03	0,07	0,03	0,08
	Huella carbono demolición (UF/m ²)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
TOTAL (UF/m ²)		20,33	23,33	22,03	20,86	18,20	18,42



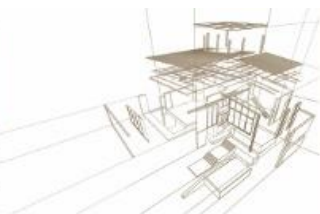
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que es rentable replicar el proyecto en madera en las ciudades de Antofagasta y Concepción, ya que los costos totales son menores a los del caso base. En Antofagasta, el costo de las viviendas sociales promedio es elevado por lo que el proyecto en madera es competitivo en dicha ciudad. En el caso de Concepción, los costos de construcción son mayores en el proyecto en madera, sin embargo, el gasto en calefacción es menor y vuelve competitivo al proyecto de madera.

En Santiago los costos del proyecto en madera son mayores a los costos de las viviendas sociales promedio construidas en la ciudad, razón por la cual no se recomienda replicar el proyecto en Santiago.

BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2015). Anuncian construcción de 6.230 viviendas en la región de Antofagasta. Recuperado el 01 de Junio 2016, desde http://www.minvu.cl/opensite_det_20150312154726.aspx
- El Mercurio. (2015). Chile necesita reparar o ampliar 1,2 millones de casas y construir otras 459 mil. Recuperado el 01 de junio 2016 desde <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2015/07/29/chile-necesita-reparar-o-ampliar-12-millones-de-casas-y-construir-otras-459-mil/>
- Steffen Lehmann, Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions, Sustainable Cities and Society, Volume 6, February 2013, Pages 57-67, ISSN 2210-6707.
- Comisión Nacional de Energía (2016). Precio parafina. Recuperado el 18 de mayo desde: <http://parafinaenlinea.cl/buscador?region=4>
- CYPE Ingenieros S.A. (2016). Precios demolición de un muro de albañilería. (2013, Septiembre). Recuperado Abril 27, 2015, de http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Demoliciones/Estructuras/Albanileria/Demolicion_de_muro_de_albanileria.html
- CADEM (2014). Informe Final: Primera Encuesta Nacional de Medio Ambiente: Opiniones, Comportamientos y Preocupaciones. Recuperado desde: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/05/Informe-Final-Primera-Encuesta-Nacional-de-Medio-Ambiente_Final.pdf
- Ilabaca et al. (1999). Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and other Respiratory Illnesses among Children in Santiago, Chile. Journal of the Air & Waste Management Association, 49(9), 154-163. doi:10.1080/10473289.1999.10463879
- Clínica Alemana (2011). Contaminación intradomiciliaria: Un enemigo silencioso que debemos conocer. Recuperado el 13 de junio desde: <https://portal.alemana.cl/wps/wcm/connect/Internet/Home/blog-de-noticias/Ano+2011/07/Contaminacion+intradomiciliaria>
- Pino et al. (2016). Contaminación intradomiciliaria por material particulado fino (MP2,5) en hogares de recién nacidos. Revista Chilena De Pediatría. doi:10.1016/j.rchipe.2016.04.007



Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41(7), 940-951.
doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.008

Gobierno de Chile (1996). Diseño sísmico de edificios. Recuperado el 20 de mayo desde:
http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/sismos/normaChilena_NCh433-1996.pdf

Chile, Gobierno Regional, Municipalidad de Antofagasta. (2015, Diciembre 17). Plan Creó Antofagasta. Recuperado Junio 12, 2016, de <http://creoantofagasta.cl/documentos-descarga/Ciudad-Sustentable.pdf>

Hammond, G. (2008). Inventory of Carbon and Energy Version 1.6a. Sustainable Energy Research Team University of Bath. Recuperado Junio 10, 2016, de
http://www.ecocem.ie/downloads/Inventory_of_Carbon_and_Energy.pdf

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M., 2005, The ecoinvent database, *International Journal of Life Cycle Assessment* 10, 3–9.

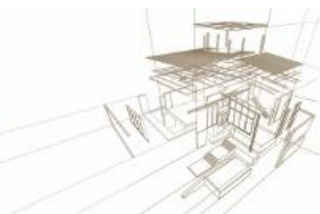
Arauco. "Arauco Efectuó la Medición de su Huella de Carbono." *Issues & Answers* (2009). Recuperado Mayo 27, 2016, de http://www.arauco.cl/_file/file_264_04.pdf

Melon. "Melon y su Huella de Carbono." *Issues & Answers* (2009). Recuperado Mayo 27, 2016, de <http://www.melon.cl/sustentabilidad/huella-co2>

Chile. MINVU. Ministerio De Vivienda Y Urbanismo. (2016). Plan FONDO SOLIDARIO DE ELECCION DE VIVIENDA D.S.49. Web. Recuperado Junio 12, 2016, de
http://www.minvu.cl/opensite_20150713124520.aspx

COCHILCO, 2012. Actualización de Información sobre las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas a la Minería del Cobre al año 2012. Recuperado Junio 10, 2016, de
http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Actualizacion-info-emisiones-gases-invernadero_2012.pdf

Suecia, Gobierno de Suecia, Ministerio de medioambiente. (2011). 20 years of carbon pricing in Sweden 1991 – 2011 History, current policy and the future. Extraído de:
<https://www.ceps.eu/sites/default/files/MinistrySweden.pdf>



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE DISTINTAS ENVOLVENTES OPACAS EMPLEADAS EN URUGUAY

THERMAL PERFORMANCE OF OPAQUE ENVELOPES USED IN URUGUAY

Diego N. Passarella⁽¹⁾ *

⁽¹⁾ Dr. Ing. en Materiales. PDU Procesos Industriales de la Madera. Universidad de la República. Tacuarembó, Uruguay

* Contacto: diego.passarella@cut.edu.uy

Resumen

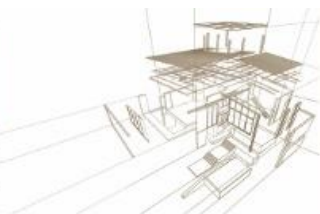
En este trabajo se analiza numéricamente el comportamiento térmico de diversas envolventes opacas (paredes) típicamente empleadas en la construcción residencial en Uruguay. En total se estudian diez envolventes opacas: tres viviendas basadas en entramado de madera con distintos tipos de fachadas ventiladas, tres paredes basadas en bloques de cemento y cuatro paredes de ladrillo de distinta tipología. Cada envolvente se modeló a través de su espesor (unidimensional) y como condiciones climáticas se consideraron los ciclos de temperatura promedio y extremos para la región norte de Uruguay (zona IIb, cálida) en verano e invierno. En el lado interior de cada pared se consideró la temperatura de confort para cada estación y se realizaron simulaciones dependientes del tiempo hasta alcanzar la respuesta representativa de cada pared a un ciclo térmico diario. Las simulaciones fueron realizadas empleando el método de diferencias finitas y aplicando condiciones de contorno de flujo en ambos extremos del dominio. Como resultados, se obtuvieron los ciclos térmicos para cada combinación de pared y condición climática en un ciclo de 24 horas. También se obtuvieron los flujos de calor incidentes y transmitidos por la pared, los cuales fueron empleados para calcular los factores de amortiguamiento, factor de retraso y consumo energético diario para mantener la condición de confort térmico interior. Los resultados obtenidos indican que las paredes de ladrillo consideradas son las que presentan mejor factor de amortiguamiento, aunque el consumo energético para mantener la temperatura de confort es similar en las paredes de ladrillo y entramado de madera con fachada ventilada.

Palabras-clave: Acondicionamiento térmico, Simulación numérica, Entramado ligero.

Abstract

The thermal behavior of opaque envelopes (walls) is numerically studied. The envelopes are representative of the ones used in housing construction in Uruguay. A total of ten opaque envelopes are analyzed: Three wood frame walls with ventilated facade, three concrete block walls and four typical brick walls where compared. Each envelope was studied along its width (one dimensional simulations). As climate conditions, thermal cycles corresponding to extreme and average summer and winter were taken into account. Temperature values representative of the northern region of Uruguay were applied. The inner side of the wall was assumed to be at comfort temperature for each season. Time dependent simulations were performed using the finite difference method up to attain a representative daily cycle response. Heat flux boundary conditions were applied at each side of the domain. As a result, the variation of temperature along the walls was obtained for each combination of envelope and climate condition. The heat fluxes were computed and values of dumping factor, thermal lag and total energy consumed to maintain the comfort temperate, were obtained. In general, brick walls present the best dumping factor, even thou wood frame with ventilated facade and brick walls require a similar amount of energy to keep comfort conditions.

Keywords: Thermal conditioning, Numerical Simulation, Wood frame



1. INTRODUCCIÓN

El noreste de Uruguay es la región que presenta indicadores más desfavorables de desarrollo social y económico en el país, Cal y otros (2012). Entre las deficiencias sistémicas de la región se encuentra el acceso a vivienda que cumplan con los estándares de confort. Dada la fuerte presencia de actividades forestales en la región y las necesidades mencionadas, en este trabajo se compara numéricamente el comportamiento de distintas envolventes utilizadas para la construcción de viviendas. En particular, se comparan envolventes de entramado de madera con fachada ventilada (EM) contra paredes típicas de construcción tradicional (T), Saez (2018) y de bloque de cemento (BC). Siendo esta última, uno de los materiales más empleados para las construcciones de bajos recursos.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se estudia el comportamiento de diez envolventes, sometidas a cuatro condiciones climáticas. Para cada combinación, se calculó el factor de amortiguación, el tiempo de retardo entre los máximos/mínimos aplicados en el exterior y percibidos en el interior y la energía necesaria para mantener la condición de confort. Las envolventes consideradas, las condiciones climáticas aplicadas y los métodos de cálculo, se detallan a continuación.

2.1. Envolventes Opacas Analizadas

La caracterización de las diez envolventes se realiza a través del espesor de cada una, donde capas de distintos materiales están presentes. La conformación de cada envoltura y los respectivos espesores de cada capa están resumidos en las Tablas 1 a 3, donde se agrupan en: Entramado de Madera (EM) (Tabla 1), Bloque de Cemento (BC) (Tabla 2) y Tradicionales (T) (Tabla 3). Las capas de materiales están ordenadas desde el exterior hacia el interior, de forma descendente. Los espesores están expresados en milímetros. Las envolventes EM se diferencian por la fachada que presentan, siendo la cámara ventilada y el panel estructural, el mismo para todas. Las envolventes BC se diferencian en el tamaño del bloque de cemento. Dos de las paredes T están basadas en ladrillos y dos en bloques.

Tabla 1.: Envolventes de entramado de madera con fachada ventilada

Capa	Espesor [mm]		
	EM1	EM2	EM3
Tablas de madera	25	–	–
Placa cementicia	–	8	–
Pared de ladrillo*	–	–	120
Cámara de aire ventilado	25		
Tablero de madera (plywood)	12		
Lana de vidrio	90		
Cámara de aire quieto	25		
Placa de yeso	12,5		

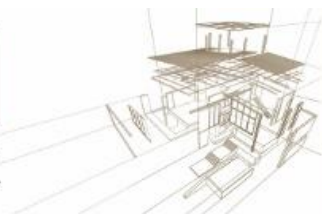


Tabla 2: Envoltentes de bloques de cemento de distinto tamaño

Capa	Espesor [mm]		
	BC1	BC2	BC3
Revoque	15		
Cemento	20		
Cámara de aire quieto**	80	–	–
	–	110	–
	–	–	150
Cemento	20		
Revoque	15		

Tabla 3: Envoltentes tradicionales

Capa	Espesor [mm]	
	T1	T2
Pared de ladrillo*	120	
Cámara de aire quieto	30	50
PS expandido	20	–
Revoque	10	
Pared de ladrillo*	120	
Revoque	15	
	T3	T4
Pared de ladrillo*	120	–
Cámara de aire quieto	30	–
Recubrimiento acrílico	–	10
PS expandido	20	50
Revoque	10	
Cemento	20	
Cámara de aire quieto**	80	
Cemento	20	
Revoque	15	

La respuesta térmica de los materiales de cada capa se caracteriza por la denominada difusividad térmica (α), la cual es el cociente entre la conductividad térmica (k) y el producto de la densidad por el calor específico ($\rho \cdot C_p$). Los valores de α para cada material se resumen en la Tabla 4.

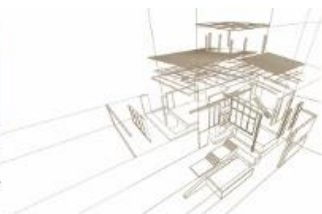


Tabla 4: Propiedades térmicas de materiales.

Material	α [m ² /s]
Yeso	1,56e-07
Aire quieto	2,14e-05
Lana de vidrio	6,25e-07
Madera	1,60e-07
Plywood	1,13e-07
Cemento	3,75e-07
Ladrillo	5,20e-07
PS expandido	7,62e-07
Acrílico	1,09e-07

En las envolventes, la pared de ladrillo* de las Tablas 1 a 3 fue considerada como una mezcla de 73% ladrillo y 27% cemento, teniendo en cuenta las juntas entre ladrillos. Por otro lado, en las envolventes con bloques, la cámara de aire quieto** fue considerada como una combinación de 57% aire y 43% cemento, por las nervaduras transversales que suelen presentar los bloques en su espesor. El resto de las capas fue considerada compuesta por 100% del correspondiente material.

2.2. Condiciones Climáticas Consideradas

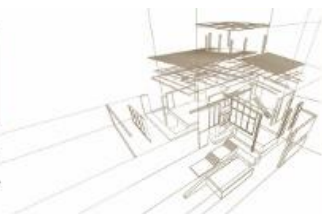
La caracterización térmica de la región se realizó utilizando datos de temperaturas medias y extremas de la Zona IIB (Cálida) durante verano e invierno, Picción y otros (2009) y aplicándolas en un perfil del tipo Parson & Logan, Soto Francés y otros (2013). El perfil está descrito en las ecuaciones (1) y (2) el cual requiere de valores máximos y mínimos de temperatura y horarios de salida y puesta del sol. Los ciclos térmicos estudiados y el rango de la temperatura de confort se presentan en la Figura 1. Se consideró la condición de verano máximo, verano medio, invierno medio e invierno mínimo. Como temperatura de confort del ambiente interior, se consideró 20°C para invierno y 27°C para verano, de acuerdo con Picción y otros (2009) y Saez (2018).

$$T_{\text{día}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \sin\left(\frac{\pi(t-t_{\text{min}})}{Y+2a}\right) + T_{\text{min}} \quad (1)$$

$$T_{\text{noche}} = T_{\text{min}} + (T_{\text{atr}} - T_{\text{min}}) e^{\frac{-b(t-t_{\text{atr}})}{Z}} \quad (2)$$

donde:

- $T_{\text{día}}$ y T_{noche} son las temperatura durante el día y la noche, respectivamente
- T_{max} y T_{min} son las temperaturas máximas y mínimas registradas, respectivamente.
- t_{min} es la hora a la que se registra la temperatura mínima (amanecer)



- Y y Z son la duración del día y de la noche, respectivamente
- a es el coeficiente de retraso de la temperatura máxima
- T_{atr} es la temperatura al amanecer
- b es un coeficiente elegido para empalmar de forma continua en el punto mínimo

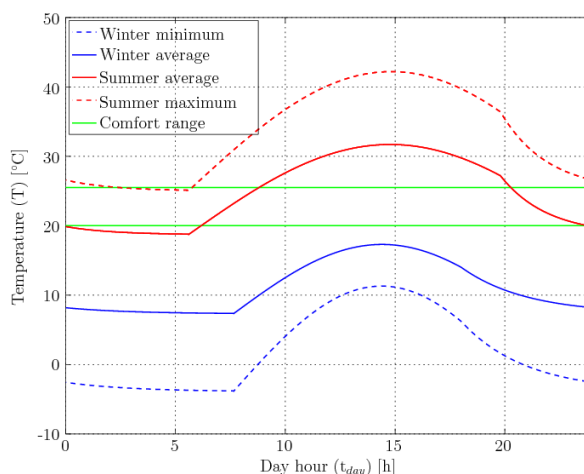


Figura 1: Ciclos térmicos considerados

2.3. Modelos

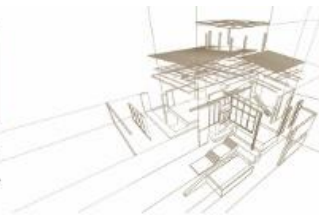
El comportamiento de las envolventes opacas fue estudiado a través de la respuesta de cada envolvente ante una secuencia de ciclos térmicos tal como los descritos en la sección 2.2. Partiendo de una condición de temperatura constante en cada envolvente, se aplicaron del orden de diez ciclos térmicos hasta que la respuesta en el interior de la pared se corroboró cíclica también. Las paredes sin fachada ventilada fueron resueltas a través de la ecuación de conducción, mientras que en el caso de la presencia de fachadas ventiladas, se incorporó un modelo específico, de acuerdo a Soto Francés (2013).

2.3.1. Conducción Térmica

La conducción térmica a través de las envolventes descritas en las tablas 2 y 3 fue resuelta a través de la ecuación de conducción (ecuación (3)), empleando condiciones de contorno de flujo en ambos extremos y tomando la temperatura exterior variable ($T_{ext}(t)$) y la de confort constante (T_{conf}) (ecuaciones (4) y (5)) en valores acordes a la estación considerada. La condición inicial de temperatura fue constante, o lineal en el caso que la temperatura exterior e interior no tuvieran un valor coincidente (ecuación (6)).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

con



$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext}(T(x, t) - T_{ext}(t)) \text{ en } x=0 \text{ y para todo } t \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{inn}(T(x, t) - T_{conf}) \text{ en } x=x_f \text{ y para todo } t \quad (5)$$

$$T(x, 0) = T_0(x) \text{ en todo } x \text{ y para } t=0 \quad (6)$$

donde:

- h_{ext} es el coeficiente de transferencia de calor hacia el exterior, igual a 18,6 W/K.m², según Xing Jin y otros (2012)
- $T_{ext}(t)$ es la temperatura descrita por las ecuaciones (1) y (2)
- h_{inn} es el coeficiente de transferencia de calor hacia el exterior, igual a 8,7 W/K.m², según Xing Jin y otros (2012)
- T_{conf} es la temperatura de confort de cada estación
- $T_0(x)$ es la temperatura inicial

En este modelo, el intercambio térmico hacia ambos lados de la envolvente se impone como flujos de calor lineales con la diferencia de temperatura entre el medio (exterior o interior) y la superficie (externa o interna) de la pared (ecuaciones (4) y (5)). De esta forma, el intercambio está controlado por la diferencia de temperatura, más que la temperatura misma, siendo ésta una descripción más representativa de la realidad que la imposición de valores en los extremos.

2.3.2. Fachada Ventilada

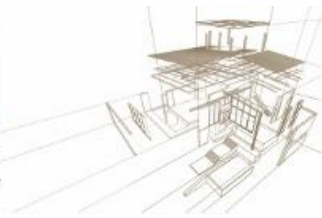
El modelo transferencia de calor a través de la fachada ventilada fue adaptado de Soto Francés y otros (2013). En una fachada ventilada, se permite la convección de aire entre la piel exterior y la pared estructural. En ese proceso, el aire es calentado/enfriado por la fachada, el cual a su vez, circula y calienta/enfría a la pared. Para describir el proceso, es necesario calcular la evolución de la temperatura del aire en la cámara ventilada, su velocidad y los coeficientes de transferencia de calor entre las dos capas de la envolvente y la cámara de aire. El modelo utilizado se describe por las siguientes ecuaciones:

$$h_f = 0.85 \left(1.959 + 1.517(|T_f - T_a|)^{1/3} + 4/3 v_a \right) \quad (7)$$

$$h_w = 0.85 \left(1.959 + 1.517(|T_w - T_a|)^{1/3} + 4/3 v_a \right) \quad (8)$$

donde

- h_f y h_w son los coeficientes de transferencia de calor entre la cámara ventilada y la fachada y pared, respectivamente.
- T_f y T_w son las temperaturas en las superficies de la fachada y la pared que están expuestas a la cámara ventilada.
- T_a es la temperatura del aire que circula por la fachada ventilada



- v_a es la velocidad de convección del aire dentro de la fachada

Los coeficientes h_f y h_w son usados en condiciones de contorno similares a las ecuaciones (4) y (5), pero tomando a T_a como temperatura de referencia y describiendo el intercambio entre la piel exterior y la pared estructural a través de la cámara ventilada. La velocidad de convección del aire se presenta en la ecuación (9), mientras que la evolución de la temperatura del aire, en la ecuación (10). Ésta última ecuación toma como longitud característica el espesor de la cámara, dado que el modelo describe la transferencia de calor a través de esa dirección.

$$v_a = 0.29 \sqrt{2gL \frac{|T_f - T_a|}{T_a}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{-v_a}{L} (T_a - T_f) \quad (10)$$

donde:

- g es la aceleración de la gravedad
- L es el espesor de la cámara ventilada

Considerar que la temperatura de la fachada (T_f) es la encargada de dictar las variaciones de temperatura y velocidad del aire, corresponde a que en este modelo, la actuación del exterior es la responsable de los cambios en el lado interior de la envolvente.

El modelo de fachada ventilada asume que en todo el espesor de la cámara ventilada, la temperatura del aire es constante.

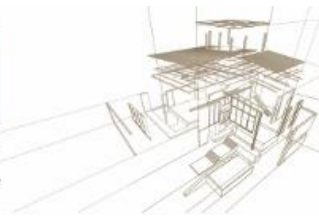
2.4. Métodos Numéricos

El modelo, ya sea para envolventes con o sin fachada ventilada, fue resuelto por el método de diferencias finitas. Se empleó un esquema centrado en el espacio e implícito en tiempo, con una evolución temporal dada por un esquema Crank-Nicholson, Quarteroni, A. y Salieri, F. (2006). La ecuación (3) discretizada de acuerdo a los esquemas seleccionados, queda:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{h_t}{h_x^2} \left\{ \frac{1}{2} [\alpha_{i-1/2} T_{i-1}^{j+1} - (\alpha_{i-1/2} + \alpha_{i+1/2}) T_i^{j+1} + \alpha_{i+1/2} T_{i+1}^{j+1}] + \dots \right. \\ \left. \frac{1}{2} [\alpha_{i-1/2} T_{i-1}^j - (\alpha_{i-1/2} + \alpha_{i+1/2}) T_i^j + \alpha_{i+1/2} T_{i+1}^j] \right\} \quad (11)$$

donde:

- h_t es el intervalo de la discretización temporal, tomado como $h_t = 10s$
- h_x es el intervalo de la discretización espacial, tomado como $h_x = 1$ o 2 mm, dependiendo del espesor de cada capa de material.
- i son los índices que indican la posición del nodo en el espesor de la envolvente
- j son los índices que indican la evolución temporal de la simulación.



El esquema de la ecuación (11) es un esquema implícito, por lo que la evolución temporal se resuelve con un bucle que recorre los índices desde $j=2$ ($j=1$ es la condición inicial de temperatura) hasta $j=N_t$, donde para cada tiempo se resuelve el sistema lineal:

$$A(\alpha(x))T^{j+i} = b(T^j) \quad (12)$$

donde:

- $A(\alpha(x))$ es una matriz tridiagonal con coeficientes que dependen del valor de la difusividad térmica en cada punto del espesor de la envolvente.
- T^{j+i} es el vector de temperaturas en el tiempo $j+1$ a ser resuelto
- $b(T^j)$ es el vector de términos independientes que dependen de la temperatura en el tiempo j y de las condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno a cada lado de la envolvente (ecuaciones (4) y (5)) quedan:

$$k \frac{-3T_0^i + 4T_1^i - T_2^i}{2h_x} = h_{ext} (T_0^i - T_{ext}(t_i)) \quad (13)$$

$$-k \frac{T_{N_x-2}^i - 4T_{N_x-1}^i + 3T_{N_x}^i}{2h_x} = h_{inn} (T_{N_x}^i - T_{conf}) \quad (14)$$

De esta forma se obtienen los valores de los extremos (T_0^i y $T_{N_x}^i$) como función de los valores en el interior de la envolvente y de ambos lados externos. Estos valores son los que son integrados en el vector $b(T)$ en el sistema lineal de la ecuación (12).

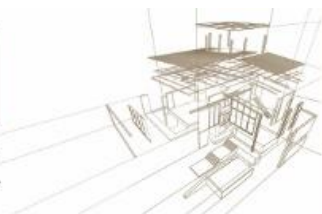
Una aplicación similar de las condiciones de contorno se realiza entre la cámara ventilada y la piel exterior o la pared portante, en el caso de envolventes con fachada ventilada.

El par de ecuaciones (13) y (14) permiten computar directamente el valor del flujo de calor que ingresa/sale de la envolvente desde el exterior (ecuación (13)) y el equivalente en el lado interior (ecuación (14)). Estos valores son los que serán usados para evaluar el factor de amortiguamiento, el tiempo de retraso y la energía térmica consumida por cada envolvente.

El comportamiento de cada envolvente durante un ciclo diario se obtiene de la respuesta ante la aplicación de entre ocho y diez ciclos consecutivos tales como los descritos en la Figura 1. El último ciclo (día) de la simulación es el utilizado para evaluar la envolvente.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cada combinación de envolvente (Tablas 1, 2 y 3) y condición climática (Figura 1) se obtuvieron los valores de temperatura y flujos de calor durante un ciclo diario. Como ejemplo, se presenta en la Figura 2 la evolución de temperaturas para la envolvente de fachada ventilada con piel exterior de madera (EM1), para el caso de temperaturas mínimas de invierno. En ella se observa la temperatura exterior (línea negra), la temperatura de la piel exterior de madera (línea roja), la temperatura del aire que circula por la cámara ventilada (línea verde), como las temperaturas exteriores e interiores de la pared portante de entramado de madera (líneas azules). En esa figura se observan, el efecto de amortiguación (en capas interiores de la envolvente las temperaturas son



menos extremas) que toman los valores de temperatura en diversas partes de a envolvente, cómo así también el fenómeno de retardo, en el cual los máximos y mínimos se van desfasando en el tiempo.

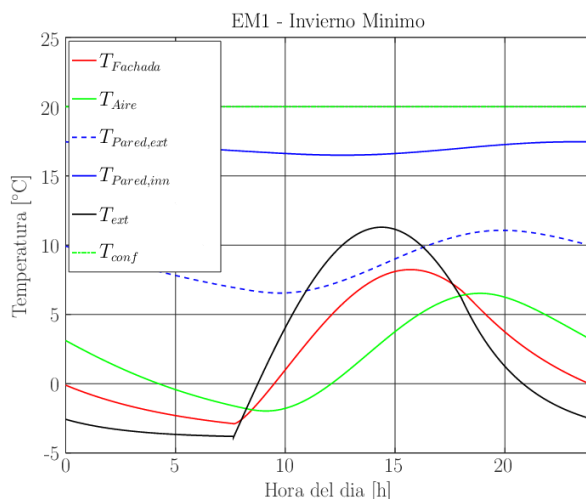


Figura 2: Ejemplo de evolución de temperaturas durante un ciclo diario

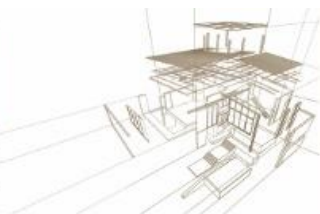
En este trabajo se trabajó con los flujos de calor (ecuaciones (4) y (5)) como valores descriptivos del comportamiento térmico, en contraposición a fijar el valor de temperatura en los extremos de la envolvente, tal como se realizan Picción y otros (2009) y Soto Francés y otros (2013). A partir de los flujos de calor se obtuvieron los valores de factor de amortiguamiento (f), tiempo de retardo (Φ) y energía térmica consumida (Q_d), tal como se presenta en Xin Jing y otros (2012). El cómputo de estos valores de detalla a continuación:

$$f = \frac{\max(q_w^{inn})}{\max(q_w^{ext})} \quad (15)$$

$$\phi = t(\max(q_w^{inn})) - t(\max(q_w^{ext})) \quad (16)$$

$$Q_d = \int q_w^{inn} dt \quad (17)$$

Donde f es el cociente entre el máximo (mínimo) flujo de calor que se manifiesta en el interior de la envolvente y el correspondiente que incide en el exterior. Los máximos se computan en estaciones estivales, mientras que los mínimos en invernales. Cuanto menor a la unidad resulte f , más amortiguación térmica presentará la envolvente. Φ es el tiempo que tarda en manifestarse el correspondiente extremo en el interior, una vez ocurrido en el exterior. Valores convenientes de Φ deben ser cercanos a 12 horas, para actuar a contra fase del momento más frío/cálido del día. Por último, la energía térmica consumida, es la integral del flujo de calor actuante en la cara interior de la envolvente. Es un valor de energía total diaria por metro cuadrado de envolvente, que debe ser entregada a (o absorbida de) ella para mantener la condición de confort. Valores negativos indican la necesidad de calefaccionar el ambiente, mientras que valores positivos, lo contrario. Es deseable que se mantenga cercano a cero, indicando que no hay que entregar/absorber energía neta durante el día.

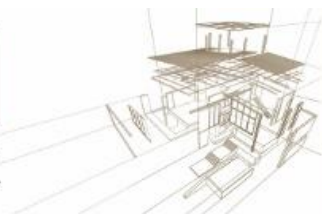


Un resumen de los valores obtenidos de f , Φ y Q_d , para cada condición climática y envolvente, se presentan en las Tabla 5 y 6. Los resultados indican que la condición de invierno es más severa que la de verano en cuanto a la distancia de la condición de confort. El conjunto de paredes con mayor capacidad de amortiguamiento son las tradicionales, seguidas por aquellas con fachada ventilada y entramado de madera. En general, todas las envolventes presentan tiempos de retraso aceptables, a excepción de la EM3 y las tradicionales, las cuales poseen tiempos ligeramente extensos. La energía térmica necesaria por metro cuadrado de envolvente, para mantener la condición de confort durante un día, se presenta en la Tabla 6. Las envolventes más convenientes vuelven a resultar las tradicionales, con un consumo aproximadamente 20% superior por parte de las de entramado de madera. Los consumos energéticos por parte de las envolventes de bloques son cercanos al doble de las otras, demostrando la inconveniencia de su uso.

Tabla 5: Resultados de factor de amortiguamiento y retraso para las condiciones estudiadas

	Factor de amortiguamiento f [--]				Tiempo de retraso Φ [h]			
	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min
EM1	0,48243	0,41953	0,80647	0,76682	6,4417	7,1861	8,8056	8,8333
EM2	0,48061	0,42206	0,80733	0,76812	6,4889	7,4278	9,0806	9,111
EM3	0,5647	0,43304	0,83324	0,79414	5,7333	5,5500	4,6056	4,5889
BC1	0,63537	0,57022	0,87046	0,84256	5,3028	7,8361	10,553	10,553
BC2	0,57599	0,51242	0,84323	0,81043	5,6472	7,8028	10,289	10,308
BC3	0,51586	0,45245	0,81489	0,77714	5,9889	7,7722	9,9833	10,003
T1	0,14138	0,098905	0,33212	0,29975	11,003	12,967	14,256	14,267
T2	0,14629	0,10343	0,33847	0,30651	10,736	12,700	13,958	13,972
T3	0,16179	0,11642	0,3535	0,3228	10,353	12,306	13,697	13,711
T4	0,22229	0,19023	0,37161	0,3534	7,4667	9,0222	10,578	10,592

Tabla 6: Resultados de energía térmica necesaria para mantener el confort diario



	Energía térmica consumida Q_d [kcal/m ²]			
	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min
EM1	164,51	-50,379	-413,77	-474,45
EM2	171,23	-52,45	-415,74	-479,07
EM3	170,97	-52,32	-415,6	-478,7
BC1	325,18	-101,35	-803,96	-914,11
BC2	322,91	-100,66	-798,38	-907,77
BC3	319,57	-99,619	-790,13	-898,39
T1	137,57	-42,891	-340,15	-386,76
T2	142,14	-44,316	-351,46	-399,62
T3	155,76	-48,563	-385,14	-437,91
T4	186,51	-58,149	-461,17	-524,36

4. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio comparado del comportamiento térmico de distintas envolventes empleando simulación numérica. Los resultados sugieren que las envolventes de entramado de madera con fachada ventilada poseen un comportamiento similar a las tradicionales, pudiéndose mejorar la demanda energética necesaria para mantener las condiciones de confort.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cal, D., Rodríguez Miranda, A., Bonino Gayoso, N. y Viejo Mandl, C. (2012). Diagnósticos y diferentes visiones sobre la dinámica socio-económica en la Región Noreste. Serie: Documentos de Trabajo de CCI N° 4, Udelar, Uruguay.

Picción, A., Camacho, M., López Salgado, Ma N. y Milicua, S. (2009). Pautas de diseño bioclimático para optimizar condiciones de confort y uso de energía en el sector residencial financiado por organismos públicos, para Uruguay, caso de clima complejo. Facultad de Arquitectura, Udelar, Uruguay.

Quarteroni, A. y Salieri, F. (2006) Scientific Computing with MATLAB and Octave. Springer (2nd edition).

Saez, S. (2018) Caracterización de envolventes opacas edilicias de construcción tradicional más utilizadas en Cooperativas de Vivienda de Montevideo, Uruguay. Análisis del perfil de sus variables termo-energetico-constructivas-economicas. Especialización en Arquitectura y Hábitat Sustentable, Universidad Nacional de La Plata, Argentina (tesis).

Soto Francés, V.M., Sarabia Escriba, E.J., Pinazo Ojer, J.M., Bannier, E., Cantavella Soler, V. y Silva Moreno, G. (2013). Modeling of ventilated facades for energy building simulation software. Energy and Buildings 65, pgs. 419-428.

Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yiran Cao y Geng Wang (2012). Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. Energy and Buildings 47, pgs. 369-374.



LA CASA URUGUAYA: EL USO DE LA MADERA EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

LA CASA URUGUAYA: THE USE OF WOOD IN BIOCLIMATIC ARCHITECTURE

Amadeo, Paz

Arquitecta. La Casa Uruguay S.A. Montevideo, Uruguay

* Contacto: paz@lacasauruguay.com

Resumen

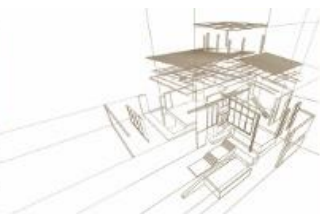
En esta presentación se busca analizar el uso de la madera como elemento al servicio de la arquitectura bioclimática. La sustentabilidad y la eficiencia energética son dos temas que han estado siendo tratados en los últimos años. La arquitectura no puede ser ajena a los mismos ya que la industria de la construcción, tanto a nivel local como global, contribuye al impacto ambiental consumiendo la mayor parte de energía y de recursos naturales. Es por esta razón que cada vez hay más sistemas constructivos alternativos al hormigón y el acero, como la construcción en madera. La arquitectura bioclimática es la cual diseña edificios considerando las condiciones climáticas del lugar donde va a estar implantado. En dicho diseño se busca aprovechar los recursos disponibles para intentar reducir los consumos de energía. En La Casa Uruguay se utiliza la madera no solo como estructura, sino aprovechando sus características para lograr distintas soluciones que ayuden a mejorar el confort del usuario. En el caso de la arquitectura bioclimática, existen distintas estrategias pasivas para lograr una mejor eficiencia energética en las construcciones. Las cuales resultan fácilmente aplicables a cualquier edificio utilizando la madera como material. Dichas estrategias son: la aislación térmica, las características hidrocópicas de los materiales y las protecciones solares. Las cuales son traducidas en elementos de las construcciones como el uso de la segunda piel, sobretecho y voladizos, la decisión de elevar la construcción del suelo y la incorporación de aislante térmico en la masa constitutiva de la envolvente.

Bioclimática, Energía, Estrategias pasivas

Abstract

This presentation seeks to analyze the use of wood as an element in the service of bioclimatic architecture. Sustainability and energy efficiency are two issues that have been addressed in recent years. The architecture can not be alien to them since the construction industry, both locally and globally, contributes to the environmental impact by consuming most of the energy and natural resources. It is for this reason that there are increasingly more alternative construction systems to concrete and steel, such as wood construction. The bioclimatic architecture is the one that designs buildings considering the climatic conditions of the place where it is going to be implanted. This design seeks to take advantage of available resources to reduce energy consumption. In La Casa Uruguay, wood is used not only as a structure, but taking advantage of its characteristics to achieve different solutions that help improve user comfort. In the case of bioclimatic architecture, there are different passive strategies to achieve a better energy efficiency in buildings. Which are easily applicable to any building using wood as a material. These strategies are: the thermal insulation, the hydroscopic characteristics of the materials and the solar protections. Which are translated into elements of the building such as the use of a second skin, over-roof and overhangs, the decision to raise the construction of the floor and the incorporation of thermal insulation in the building envelope.

Bioclimatic, Energy, Passive strategies



1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción, tanto a nivel local como global, contribuye al impacto ambiental consumiendo la mayor parte de energía y de recursos naturales. Es por esta razón que cada vez hay más sistemas constructivos alternativos al hormigón y el acero, como la construcción en madera.

En el artículo se analizará el uso de la madera en viviendas desde el punto de vista de su aplicación en estrategias de la arquitectura bioclimática. Las estrategias pasivas utilizadas en dicha arquitectura ayudan a realizar edificios con mejores prestaciones en cuanto a la eficiencia energética.

La arquitectura bioclimática es la cual diseña edificios considerando las condiciones climáticas del lugar donde va a estar implantado. En dicho diseño se busca aprovechar los recursos disponibles para intentar reducir los consumos de energía. Gonzalez (2003) nos explica que: “La comprensión de los factores climáticos, su incidencia en la envolvente de los edificios y la relación funcional de estos factores a fin de lograr el máximo confort a los habitantes es lo que se designa como arquitectura bioclimática”.

Esta arquitectura que ayuda a combatir el deterioro del ambiente, se realiza a partir de aplicar estrategias tanto pasivas como activas, que pueden ser resueltas de distintas maneras. El estudio y aplicación de estas son tan importantes “como los planos, la estructura, los servicios, el espacio y la forma de un edificio y, como es evidente, tienen un efecto en la configuración final de estos elementos” (Jones 2002).

El clima es de suma importancia para la arquitectura bioclimática ya que “es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una zona geográfica” (Rodríguez et al. 2002), por lo tanto en cada zona se tendrán que aplicar ciertas estrategias que no funcionan para otra.

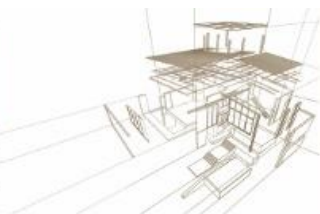
Como caso de estudio se toma la vivienda realizada en La Casa Uruguay para el concurso internacional Solar Decathlon SDLAC 2015, la cual resultó ganadora del mismo. Dicha casa cuenta con mediciones reales tomadas tanto durante el transcurso del concurso como en el presente, ya que se encuentra emplazada en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

En este artículo se busca demostrar por qué la utilización de la madera en la construcción junto a estrategias de la arquitectura bioclimática, ayuda a la reducción de energía y de dióxido de carbono en las viviendas.

2. METODOLOGÍA

Se comenzará por el estudio de las estrategias pasivas que pueden ser utilizadas en Uruguay, mostrando distintos ejemplos para ver de qué manera se pueden aplicar dichas estrategias. Se pasará a analizar cómo La Casa Uruguay (LCU) aplica las estrategias y cómo brinda una solución a través del uso de la madera.

Luego, se mostrarán los números calculados durante el concurso de la energía y el dióxido de carbono incorporado en la construcción prefabricada de LCU en comparación con una vivienda de hormigón.



3. ANÁLISIS

En los últimos años se ha visto un aumento, por parte de la sociedad, en el interés por el cuidado del medioambiente. Se puede decir que el cambio climático ha afectado cómo las personas intentan satisfacer sus necesidades de un modo más sustentable. Para esto, “es importante el conocimiento de la arquitectura bioclimática como una de sus vías alternativas” (Juan Manuel Nuche Cabrera en Introducción a la arquitectura bioclimática).

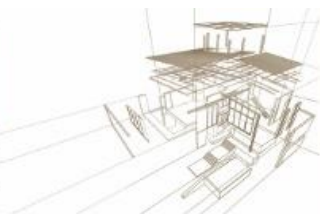
Al comenzar a analizar los distintos elementos del clima para poder realizar una construcción en base a la arquitectura bioclimática, se ve un cambio en el diseño de la misma. Ya que de las condiciones del lugar, depende de cómo vamos a realizar dicha construcción: “muros pesados o ligeros, de cubiertas inclinadas o planas, de color oscuro o claro, con grandes vanos o pequeñas ventanas, etcétera; donde la edificación será un elemento protector y regulador que rechace o transforme la acción de los elementos ambientales naturales de un lugar” (Rodríguez et al. 2002).

A raíz de tomar las distintas estrategias de dicha arquitectura durante el proceso creativo de diseño, se termina creando un nuevo lenguaje arquitectónico. Según Jones (2002), el análisis, la elaboración e incorporación de estrategias de esta arquitectura son igualmente importantes a los planos (estructura, eléctrica, sanitaria) y la forma del edificio, por lo que termina teniendo gran impacto en “la configuración final de estos elementos”.

Existen distintas estrategias para cada clima y región geográfica. Las mismas pueden ser aplicadas de distintas formas para lograr el correcto funcionamiento de dichas estrategias. En zonas cálidas, se utilizan estrategias como refrigeración evaporativa, control de la incidencia solar sobre los edificios, la utilización de la capacidad térmica de los materiales para aislar. En zonas frías, se utiliza al máximo la capacidad térmica de los materiales pero, a diferencia de las zonas cálidas, para facilitar la calefacción de los ambientes y se utiliza la incidencia solar a favor. En las zonas templadas, se utilizan combinaciones de las estrategias nombradas anteriormente para “ajustarse al máximo a las características climáticas de cada lugar” (Jones 2002).

Con el objetivo de lograr que un edificio conserve la energía lo mejor posible, hay que diseñarlo utilizando la energía natural de la mejor manera. Esta energía se puede obtener de: “los rayos del sol, el viento y la luz diurna” (Jones 2002). A este diseño, el que utiliza el clima a favor de la arquitectura, se le denomina diseño solar pasivo. El clima cumple una función fundamental en este diseño solar pasivo, “de las condiciones atmosféricas de un lugar depende que la arquitectura sea de muros pesados o ligeros” (Rodríguez et al. 2002).

“Un edificio bien aislado y construido de forma que se reduzca al máximo la filtración del frío por sus paredes se puede calentar con un gasto mínimo de energía” (Jones 2002). Para el caso de La Casa Uruguaya (LCU), se toma esta premisa como punto de partida para el diseño de las viviendas. Cuando se intenta ser eficiente energéticamente, lo primero que se debe analizar es que no se utilice energía sin necesidad. En LCU se



diseña la envolvente como hermética, o lo más hermética posible, se le denomina caja térmica. Dicha caja esta compuesta por los paneles de

madera con aislación térmica que conforman los pisos, paredes y techo, y junto con aberturas de altas prestaciones (DVH).

Además, se orienta la vivienda completamente al Norte y se colocan la mayor cantidad de aberturas hacia este lado. Al colocar un alero, en el verano la fachada Norte queda completamente en sombra bajando notablemente el impacto del sol. Este alero se calcula y diseña en base a la latitud del lugar donde esta ubicada la vivienda, logrando lo opuesto en invierno. En dicha estación, al bajar la inclinación del sol, se permite que incida directamente en las ventanas generando un efecto invernadero permitiendo calentar el interior de la vivienda sin necesidad de utilizar energía eléctrica.

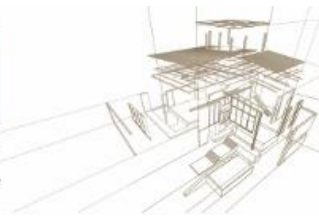
La segunda estrategia utilizada, es envolver la caja térmica con una segunda piel y sobre techo. Generando una caja dentro de otra, o una casa dentro de otra. Esta segunda capa de material ayuda a mantener la caja térmica en sombra en verano por lo que no hay incidencia directa del sol en 3 de sus lados (Este, Oeste y techo). Un techo en Montevideo pintado de negro a las 12hs del 21 de diciembre, puede alcanzar una temperatura de 78°C. Al colocarle un sobre techo, se puede bajar la misma a la temperatura del aire, que en ese momento es 32°C aproximadamente.

Esta estrategia, se realiza construyendo los elementos en madera, lo cual permite fácilmente remplazar cualquier parte que se deteriore por el paso del tiempo y las inclemencias del clima. De esta forma se genera un segundo aprovechamiento, la caja principal que es la vivienda no se va afectada directamente por el deterioro. Rodriguez et al (2002) explican como esta estrategia funciona de la siguiente forma: “Doble techumbre con el espacio interior o cámara de aire ventilada. Tiene por objeto sombrear la totalidad de la techumbre y así evitar la ganancia térmica por radiación solar”.

La tercer estrategia es la de elevar la vivienda del suelo, dejandola a 60cm del terreno. Esto se realiza para evitar la pérdida de energía hacia el terreno. Al elevarla del suelo, se debe construir el panel de piso al igual que las paredes (con aislante térmico, barrera corta vapor, etc.) generando una caja casi hermética. Al ser construida enteramente por madera, esta estrategia sirve tanto como protección por diseño para el material de construcción como estrategia bioclimática.

Al utilizar la madera como material principal de construcción, se logra una mayor rapidez de armado en obra. Ya que se puede prefabricar la mayor cantidad de elementos en un taller, donde se puede continuar trabajando incluso cuando llueve. En LCU, se prefabrica casi el 80% de la vivienda en taller, dejando el 20% para montar en obra. La construcción en madera “a menudo es hasta un 30% más rápida que los métodos de construcción más tradicionales y, por lo tanto, ofrece reducciones proporcionales en los costos” (Wilson, 2017).

Otro tema a tener en cuenta cuando se analizan viviendas bioclimáticas, es el de la energía consumida y la liberación de gases de dióxido de carbono. Pero no solo durante la construcción de la obra, si no en todo el proceso desde que se extrae la materia prima hasta que llega al producto final. A lo largo de los años se ha ido estudiando y calculando el ciclo de vida de todos los materiales, y los usados en la construcción no



han sido la excepción. Jones (2002) dice que todo edificio consume energía de distinta forma: durante la fabricación de los materiales, llamada energía incorporada; durante el transporte de dichos materiales, energía gris; durante la construcción del edificio, la energía inducida; y por el funcionamiento del mismo, energía operativa. Luego se puede analizar la utilizada durante el mantenimiento y distribución final.

Cada tipo de energía se puede reducir de distinta forma. La energía incorporada se reduce mediante la elección de materiales, en LCU se decide utilizar la madera ya que en Uruguay existe una ley de reforestación que hace que no se deprede el medio. Para la energía gris, comprando dichos materiales en industrias locales ya que reducimos los kilómetros de transporte. La energía inducida se minimiza reduciendo el desperdicio y manejando los materiales de la mejor manera posible. La energía operativa, concientizando al usuario a que reduzca el uso indiscriminado de la misma y utilizando estrategias para reducir el uso de los equipamientos (como el aire acondicionado).

En LCU además se utiliza un sistema de paneles solares para autogenerarse toda la energía que se va a usar en la vivienda. Junto con este sistema, se brinda un sistema de domótica que ayuda al usuario a utilizar mejor la energía y tiene avisos para realizar cambios y mejorar la eficiencia. Por ejemplo: si hay una ventana abierta y se enciende el aire acondicionado, el sistema avisa que no se está siendo eficiente y que hay que apagar el aire o cerrar la ventana. Toma datos del exterior para ayudar con esta decisión, si la temperatura exterior es agradable va a recomendar apagar el aire y dejar la ventana abierta.

Para el concurso SDLAC 2015, LCU junto con la empresa Carbosur se analizó el ciclo de vida de los materiales utilizados en la vivienda. A raíz de los resultados logrados por la empresa Carbosur, se puede calcular la cantidad de energía y emisiones de CO₂ por metro cuadrado de la vivienda. La misma cuenta con cien metros cuadrados por lo que los resultados finales son:

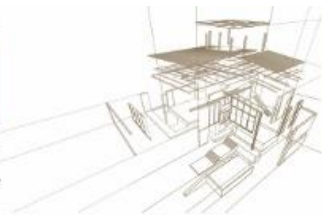
Energía incorporada 295,69 kWh/m²
Emisiones 63,97 kgCO₂/m²

Para una vivienda de construcción tradicional, la energía incorporada y las emisiones son:

Energía incorporada entre 280 y 500 kWh/m²
CO₂ incorporado entre 500 y 1000 kg CO₂/m²

Al poner las emisiones y la energía incorporada en números y comparar cada vivienda se ve una diferencia notoria de ahorro en viviendas de madera. Si se analiza la rapidez de armado, la posibilidad de continuar trabajando en la construcción sin preocuparse por el clima y el menor impacto generado al medio ambiente, se puede ver claramente cuál construcción debería de predominar en todo el mundo.

4. CONCLUSIONES



Debido a los edificios pobremente diseñados, se ha aumentado el uso de la luz eléctrica y el aire acondicionado, generando de esta manera un aumento en los distintos costos que una vivienda conlleva, siendo la misma muy poco eficiente energéticamente. Las distintas estrategias bioclimáticas, utilizadas desde hace muchos años, son un elemento clave a la hora de diseñar un edificio para ayudar a reducir el consumo de energía.

En el caso de La Casa Uruguay se puede comprender cavalmemente cómo la correcta utilización de las estrategias pasivas combinadas con sistemas de generación de energía y de control se logra una reducción sustancial tanto en las emisiones de CO₂ como en la energía incorporada y operativa de una construcción.

Además, al resolver las estrategias mediante la utilización de materiales renovables y sustentables también se logra reducir las emisiones y la energía. La madera en todo su proceso de producción contamina menos.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de La Casa Uruguay por ayudarme a desarrollar este artículo, junto a ellos pude ver de que manera podemos cambiar el mundo desde nuestro lugar como arquitectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

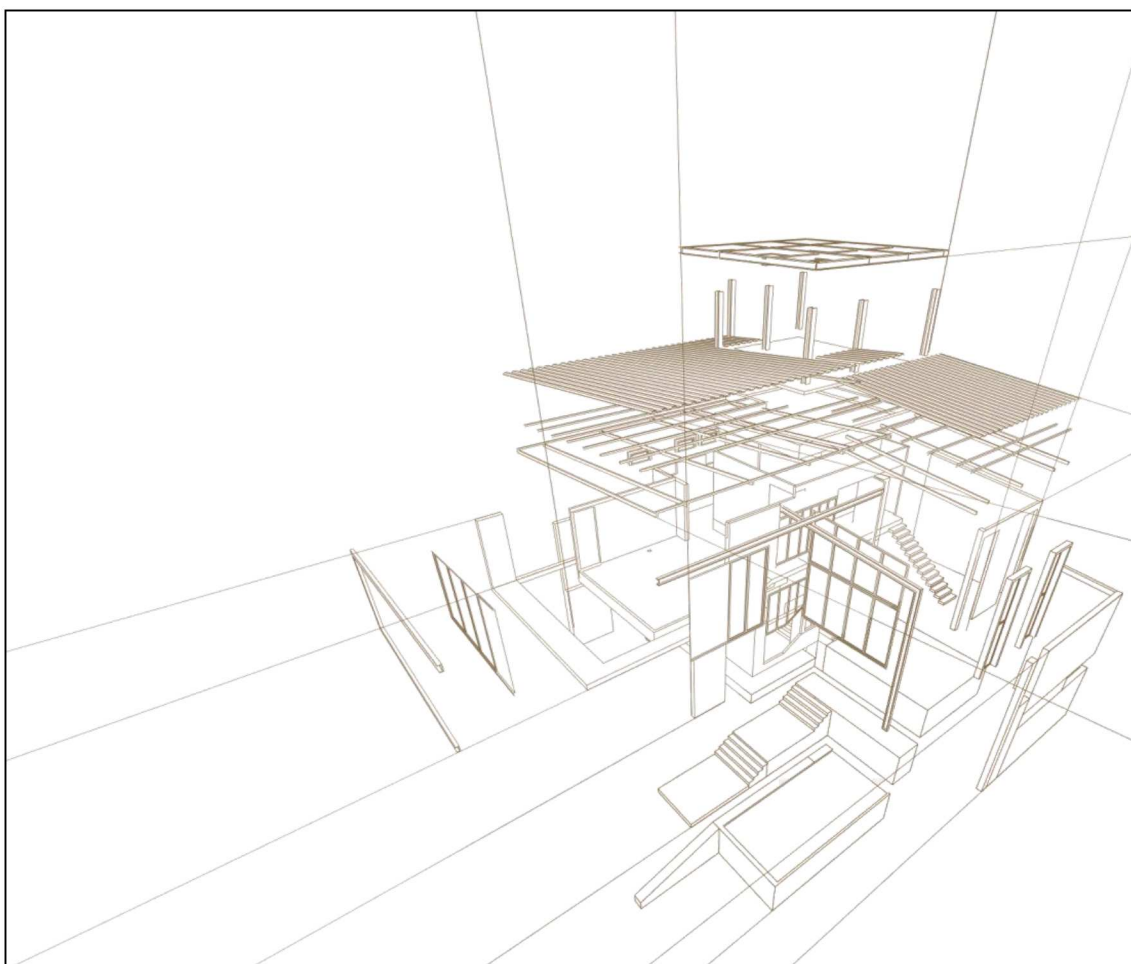
Gonzalo, Guillermo Enrique; Nota, Viviana, M., colab. (2003). Manual de Arquitectura Bioclimática. Buenos Aires, Argentina.

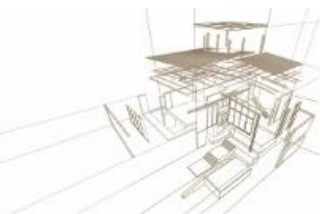
Jones, David Lloyd. (2002). Arquitectura y entorno, el diseño de la construcción bioclimática. Barcelona, España.

Rodríguez Viqueira, Manuel; Figueroa, Aníbal; Fuentes Freixanet, Víctor; García Chávez, José Roberto; Castorena Espinosa, Gloria; Guerrero Baca, Luis Fernando; Huerta Velázquez, Verónica; Rodríguez Manzo, Fausto. (2002). Introducción a la arquitectura bioclimática, Mexico.

Wilson, Peter. (2017). The Modern Timber House in the UK. New Paradigms and Technologies, Escocia.

VII. Bioeconomía en base a productos de madera





ABORDAJES DE LA BIOECONOMÍA EN URUGUAY Y SUS RELACIONES CON LOS PRODUCTOS DE MADERA

BIOECONOMY APPROACHES IN URUGUAY AND ITS RELATIONSHIP WITH WOOD PRODUCTS

Lucia Pittaluga¹, Zohra Bennadji^{2*}

¹Facultad de Ciencias Sociales, UdelaR. Montevideo, Uruguay

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal. Tacuarembó, Uruguay

* Contacto: zbennadji@inia.org.uy

Resumen

A nivel mundial, los índices de configuración de una tercera revolución industrial post-petróleo son cada vez más numerosos y se perfilan, entre otros, a través de la formulación de nuevos marcos conceptuales como, por ejemplo, el de bioeconomía. En el sector industrial, esta transición se manifiesta por la adopción de prácticas sostenibles, intensivas en uso del conocimiento y orientadas al diseño de procesos eficientes y a la obtención de productos alternativos con mayor valor agregado, como los biomateriales. El sector forestal no escapa a estas tendencias y, hoy en día, las biofábricas, las biorefinerías, los bioprocesos y la producción de biomateriales conviven cada vez más con las fábricas y los productos maderables tradicionales. Estas tendencias se ven también reflejados en el mundo académico donde han proliferado, en los últimos años, grupos de estudio e investigación en estas temáticas. En este trabajo, partiendo de una síntesis de los principales conceptos relacionados a bioeconomía y abarcando como escala de tiempo la última década (2010-2019), se procederá a una presentación de sus abordajes en Uruguay desde la perspectiva del sector público y privado y se analizarán sus relaciones con el sector forestal en general y los productos madereros en particular.

Palabras clave: Bioeconomía, productos madereros, biomateriales, Uruguay

Abstract

At global level, the signs of a third post-petroleum industrial revolution configuration are increasingly numerous and take shape, among others, through new conceptual frameworks as bioeconomy. In the industry sector, this transition is illustrated by the adoption of sustainable practices, intense in knowledge and oriented to the design of efficient processes and the obtention of alternative products with high aggregated value, like biomaterials. The forestry sector is also part of these tendencies and, nowadays, biofactories, biorefineries, bioprocesses and biomaterials production coexist with traditional factories and wood products. These trends are also present in the academic circles where study and research groups have proliferated in the last years around these thematic. In this work, based on a synthesis of the main concepts related to bioeconomy and, on the last decade, as a scale time (2010-2019), we will proceed to a presentation of the bioeconomy approaches in Uruguay from the public and private sector perspective and will analyse its relationship with the forestry sector in general and the wood products in particular.

Keywords: Bioeconomy, wood products, biomaterials, Uruguay



1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la configuración de una tercera revolución industrial post-petróleo se perfila a través de la formulación de nuevos y numerosos marcos conceptuales como, entre otros, la bioeconomía (OECD, 2009). En el sector industrial, esta transición se manifiesta por la adopción de prácticas sostenibles, intensivas en uso del conocimiento y orientadas al diseño de procesos eficientes y a la obtención de productos alternativos con mayor valor agregado, como los biomateriales. En el mundo académico han proliferado también, en los últimos años, grupos de estudio e investigación en estas temáticas. En el sector forestal, estas tendencias se reflejan en sus cadenas de valor y, hoy en día, las biofábricas, las biorefinerías, los bioprocesos y la producción de biomateriales conviven cada vez más con las fábricas y los productos maderables tradicionales (CE, 2012, 2019).

Este trabajo apunta a una síntesis de la información existente sobre los abordajes de la bioeconomía en Uruguay y sus relaciones con los productos madereros, sus procesos y los actores públicos y privados involucrados. Partiendo de una revisión de los principales conceptos relacionados a bioeconomía y, abarcando como escala de tiempo la última década (2010-2019), se procederá a una presentación de los abordajes de esta temática en Uruguay desde la perspectiva del sector público y privado y, se analizarán sus relaciones con el sector forestal en general y los productos madereros en particular.

2. METODOLOGÍA

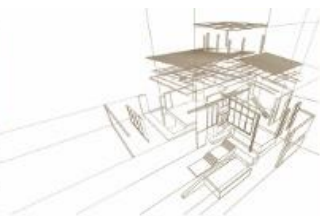
En una primera etapa, se procedió a una revisión de: (i) sitios Web de instituciones públicas y privadas involucradas en la temática de bioeconomía a nivel internacional, regional y nacional y, (ii) los aspectos relacionados a la cadena de valor de la madera en Uruguay. En segundo lugar, los resultados de la primera etapa se cotejaron con trabajos identificados en revistas arbitradas.

Se abarcó como escala de tiempo la última década (2010-2019). El universo de entidades estudiado corresponde a instituciones gubernamentales de formulación y de toma de decisiones políticas, academia (universidades públicas y privadas), centros de investigación, grandes empresas, PYMES y asociaciones de productores e industriales forestales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Síntesis de los principales conceptos relacionados a bioeconomía

La exposición de los conceptos relativos a la bioeconomía, como paradigma emergente de desarrollo sostenible, fueron, en su origen, principalmente europeos, antes de su posterior generalización y adopción en otras partes del mundo (Overbeek, et al., 2016). La mayoría de estos conceptos se expuso en el marco de estrategias nacionales, formuladas en términos generales (Laineza, et al., 2018). En los últimos años, varios países, como por ejemplo Alemania, Canadá, Finlandia y Francia profundizaron en su



implementación a través de planes de acciones para sectores productivos e industriales y para cadenas de valor (McCormick, K.; Kautto, N. 2013).

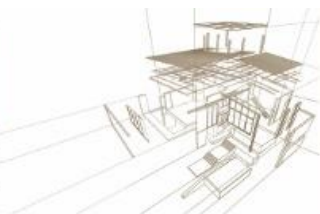
El análisis de las definiciones de la bioeconomía, extraídas de instituciones internacionales (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), 2009; Comisión Europea (CE), 2012, 2019) y de documentos de las estrategias nacionales de países considerados líderes en bioeconomía (Alemania, 2013; Finlandia, 2014; Francia, 2014; España, ; Canadá, 2013, Argentina, 2015) permite resumir sus principales conceptos en torno a la producción renovable de biomasa y a su uso para la obtención de alimentos, productos y energía, con el adecuado reciclaje de los residuos generados en los diferentes eslabones de las cadenas involucradas y en los procesos asociados.

De estas definiciones, surge también que la bioeconomía abarca varios sectores de la producción primaria, como la agricultura, los bosques y la pesca y sectores industriales de transformación de fuentes biológicas en bio-productos, como la alimentación humana y animal, las fábricas de pulpa, celulosa y papel y de transformación mecánica de la madera, las industrias químicas y de energías y las biorefinerías. Contempla adicionalmente los servicios ecosistémicos como el recreo, el bienestar y el turismo. Finalmente, es compartido el énfasis en el fuerte potencial de innovación de los sectores productivos e industriales de la bioeconomía, debido su uso intensivo de conocimiento y al amplio despliegue de investigación y desarrollo que requiere.

La definición adoptada por el Comité Asesor Internacional de Bioeconomía (International Advisory Committee on Bioeconomy, IACB por su siglas inglesas) en ocasión de la Primera Cumbre Global de Bioeconomía (Berlín, 2015), incluye el conjunto de los conceptos manejados en el párrafo anterior, estableciendo que “la bioeconomía es la producción y la utilización, basadas en el conocimiento, de recursos biológicos, procesos biológicos y principios para el abastecimiento sostenible en productos y servicios en todos los sectores económicos”.

Con relación a la generación de conocimiento en instituciones de Investigación y Desarrollo e Innovación (I+D+i), se reporta la existencia de un volumen significativo de información en la fase de producción de biomasa y de uno, relativamente menor, en su fase de transformación. En ambas fases, la biotecnología, la nanotecnología y la bioinformática aglutinan las mayores y más adelantadas masas críticas en capacidades infraestructurales y humanas. En materia de coordinación interinstitucional, sobresale una tendencia bastante generalizada de acciones conjuntas entre agencias nacionales gubernamentales, sector privado e instituciones de investigación para la elaboración consensuada de políticas, carteras de proyectos y normas y regulaciones para mercados (Overbeek, et al., 2016).

De los conceptos manejados en torno a bioeconomía y a los efectos de la orientación de este trabajo, conviene subrayar también las definiciones de los conceptos de biorrefinería y de biomateriales por su estrecha relación con las cadenas de valor. En las fuentes citadas anteriormente, los biomateriales se asimilan a productos derivados enteramente o, en parte, de biomasa y especialmente diseñados como alternativa al uso de productos obtenidos tradicionalmente a partir de recursos naturales no renovables como el petróleo. El concepto de biorefinería cubre tanto la producción integrada de



combustibles, productos químicos y materiales a partir de biomasa como la propia infraestructura asociada a esta producción.

3.2. Hacia la Estrategia de Bioeconomía en Uruguay

Desde el año 2005 regresó la planificación del desarrollo a Uruguay luego de su auge en los años 1960 y su paulatina caída en las décadas posteriores hasta desaparecer completamente en los 1990. La planificación volvió en el siglo XXI con la introducción de las técnicas más modernas de prospectiva estratégica de elaboración de futuros posibles y probables y de la construcción del futuro más deseable a través de la participación ciudadana. La bioeconomía como puntal de un desarrollo sostenible emergió en Uruguay dentro de este nuevo contexto institucional de planificación del desarrollo.

Actualmente el gobierno de Uruguay está generando insumos para lanzar un borrador de la Estrategia de Bioeconomía (EB) a fines del año 2019. La EB pretende justamente planificar la transición de Uruguay hacia la bioeconomía, es decir hacia una matriz productiva baja en carbono. Ésta se enmarca a su vez en la Estrategia Nacional de Desarrollo Uruguay 2050 elaborada por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) que tiene tres grandes pilares: el desarrollo social, la transformación de los sistemas de género y la transformación productiva. En este último pilar, la bioeconomía junto a la economía digital son el núcleo innovador que dinamiza el resto de la matriz productiva.

Estas acciones de política pública coinciden con los de otros países, los cuales como Uruguay están apostando a la bioeconomía para su desarrollo productivo. En este sentido, en América Latina y el Caribe se distinguen los países del Mercosur, Colombia, Costa Rica y México por los avances de sus estrategias. Las EB de los países europeos son las más maduras, junto a la de EEUU, Sud África, Australia, Nueva Zelanda y algunos países asiáticos.³

En el diagrama siguiente (Fig.1) se esquematizan los pasos que se han dado para avanzar en la de EB en Uruguay. Como ya se mencionó, estos desarrollos se basan en el trabajo prospectivo estratégico previo realizado por la OPP para elaborar la Estrategia Uruguay 2050.

Dentro de ese marco, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), conforme a sus lineamientos estratégicos, realizó en 2016 un acuerdo de cooperación con el Ministerio Federal de la Alimentación y la Agricultura de Alemania (BMEL por sus siglas en alemán) para trabajar en la elaboración de una EB. A ello se sumó que en 2017 comenzó a participar del Grupo de Trabajo Internacional en Bioeconomía Sostenible (ISBWG, por sus siglas en inglés), financiado por el gobierno alemán y coordinado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) en Roma.⁴

³Ver en <https://bioekonomierat.de/en/international/> un mapa con la situación de las Estrategias de Bioeconomía en el mundo.

⁴ En 2016 se estableció el ISBWG que incluye 23 miembros a la fecha de marzo de 2018. Once países (Alemania, Argentina, Brasil, China, EE.UU, Italia, Kazajistán, Malasia, Países Bajos, Sudáfrica y



A principios de 2018 Uruguay fue seleccionado como caso piloto para desarrollar su EB con el apoyo técnico del ISBWG. Dada la naturaleza transversal y sistémica de la EB, se conformó en los meses siguientes un grupo de trabajo interinstitucional de Estado para trabajar desde los diferentes focos sectoriales. Dicho grupo está conformado por la OPP, Transforma Uruguay, el MGAP, el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) y el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF).

En octubre 2018 se organizó el primer taller para alinear los diferentes esfuerzos dispersos de los organismos que se estaban llevando adelante en la misma temática. En abril 2019 se integraron otros actores no estatales al segundo taller en el que se esbozaron los objetivos estratégicos de la EB, algunas medidas/iniciativas o proyectos ligados y se identificaron, además, a grandes rasgos los principales hitos para la concreción de la EB. En julio se contrató una asesoría para apoyar el proceso de generación de insumos y sistematización de lo existente. Se pretende llegar al tercer taller en noviembre próximo con una mayor diversidad de la participación y con aportes relevantes al borrador de EB elaborado para esa fecha.

PRINCIPALES HITOS HACIA UNA ESTRATEGIA DE BIOECONOMÍA EN URUGUAY

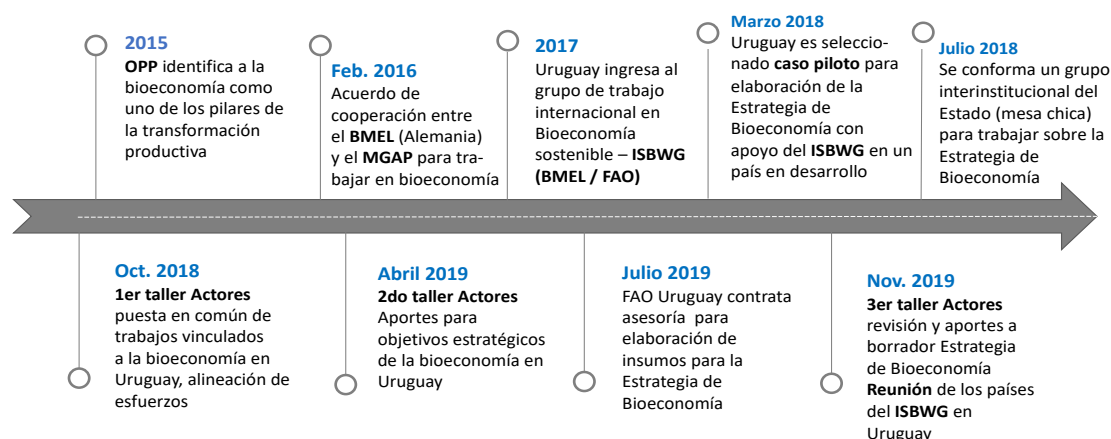


Figura 1: Avances en la elaboración de la Estrategia nacional de Bioeconomía

Uruguay), el Consejo Alemán de Bioeconomía, la Comisión de la Unión Europea, la OCDE, el International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), el PNUMA, el World Wildlife Fund (WWF), el Consejo Nórdico de Ministerios, el Consorcio de Industrias Biobasadas de la UE, el Stockholm Environment Institute (SEI), la Universidad de Wageningen, el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) y la FAO. El objetivo del ISBWG es desarrollar guías para asistir a los países y actores involucrados en desarrollar estrategias, programas e iniciativas de Bioeconomía Sostenible.

La elaboración de la EB se basa en varios esfuerzos de política pública que ya se están implementando. Algunos son complementarios a la misma mientras que otros son contradictorios. El desafío de la EB es reforzar los primeros y neutralizar los segundos.

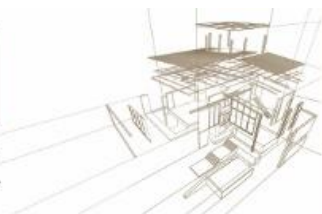
En la Fig. 2 se presenta un esquema de los tres grupos de políticas de fomento productivo que existen en el país y de un cuarto grupo de transformación de las pautas de consumo que aún no está definido. Un primer conjunto de políticas en la base de la EB son las políticas y planes de fomento al desarrollo sostenible (Plan Ambiental Nacional para el Desarrollo Sostenible; Política Nacional de Cambio Climático y la primera Contribución Determinada a Nivel Nacional; Plan Nacional de Aguas; Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Sostenible de la Diversidad Biológica) cuyo liderazgo proviene del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVTOMA), de los otros ministerios sectoriales y del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC).

Un segundo grupo de políticas son las sectoriales conformado por las que lidera el MGAP a través de la plataforma Uruguay Agro-inteligente y el MIEM que lleva adelante la política energética, la que ha permitido la transformación radical de las fuentes de energía eléctrica hacia las energías renovables, y el Plan Sectorial de Biotecnología 2020. También existen otras políticas sectoriales ligadas a la bioeconomía en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Instituto Antártico Uruguayo (IAU), la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR) del grupo ANCAP, el Instituto de Regulación y Control del Cannabis (IRCCA) y Transforma Uruguay entre otros.

Finalmente, entre las políticas horizontales existen los regímenes de exoneración fiscal, a través de la Ley de Promoción de Inversiones y de Zonas Francas, y de fomento a la I+D+i a través de los programas de la Agencia Nacional de Innovación e Investigación (ANII) y de la Agencia Nacional de Desarrollo (ANDE).



Figura 2: Esquema de los grupos de políticas de fomento productivo



El objetivo de la EB es transformar la matriz productiva teniendo en cuenta la pirámide de la bioeconomía que figura en el diagrama siguiente (Fig. 3). Este se resume de la siguiente manera: a partir de la biomasa surge un sinfín de oportunidades para manufacturar nuevos productos, cuyo valor de mercado va de menor (biocombustibles) a mayor (farmacéuticos), pasando por productos químicos a granel, materiales o alimentos; mientras que el volumen de mercado actual de cada producto va en dirección contraria a través de la pirámide, de mayor (biocombustibles) a menor (farmacéuticos); por su lado, se crean nuevos servicios ligados a la manufactura de esos productos y, la digitalización y la economía circular se transforman en el nuevo sentido común para llevar adelante los procesos productivos.

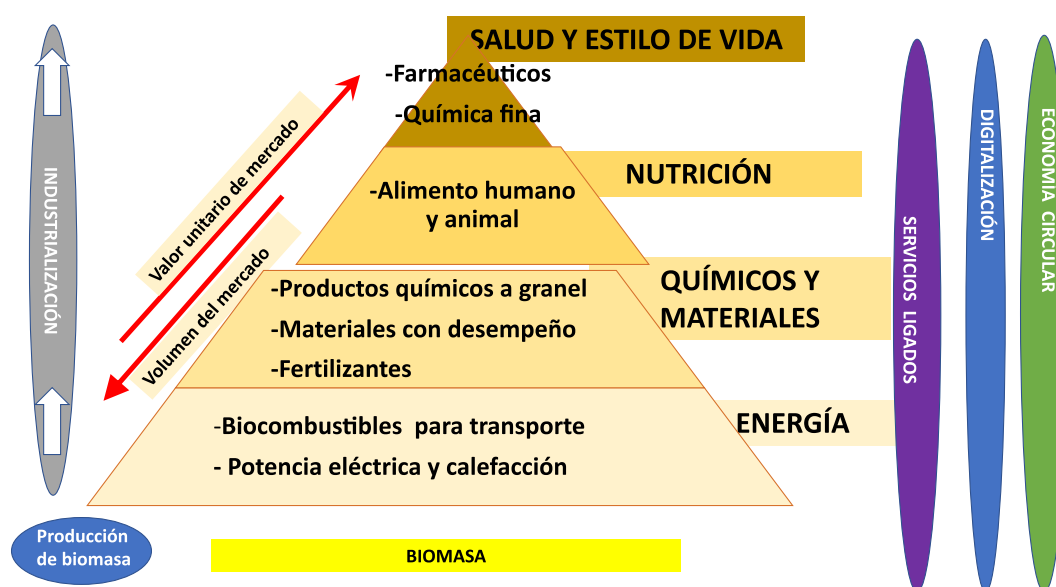


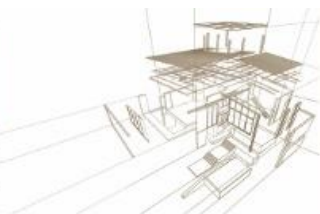
Figura 3: Pirámide de la bioeconomía y su relación con la transformación de la matriz productiva.

Fuente: Elaboración propia a partir de German Bioeconomy Council (2010) y Ministry of Employment and Economy, Finland (2017).

En suma, Uruguay está encaminado hacia la elaboración de la EB que pretende generar un complejo productivo dinámico que impacte sobre el resto de la matriz productiva y permita, junto a otros componentes de la Estrategia Nacional de Desarrollo, la transición del país hacia el desarrollo sostenible de largo plazo.

3.3. Abordajes en el sector forestal

El complejo forestal-maderero constituye una de las transformaciones productivas más importantes experimentada por la economía uruguaya en las últimas tres décadas. Esta transformación se ha producido tanto a nivel de la producción primaria, como de la industrial, la logística y la producción de energía. En su fase de transformación



industrial coexisten dos grandes subsectores: el de la transformación química o celulósico y el de la transformación mecánica o de aserrío.

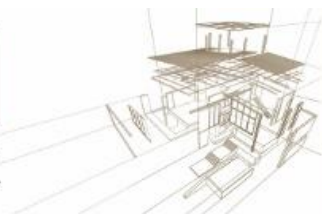
En la última década, varios aspectos relacionados, directa e indirectamente a la temática de bioeconomía empezaron a abordarse en el sector forestal, con una predominancia de iniciativas impulsadas, en primera instancia, desde el gobierno. Estas iniciativas gubernamentales se caracterizaron, en su mayoría, por su fuerte apuesta a la coordinación interinstitucional y a la inclusión del sector privado. La creación de consejos sectoriales con participación público-privada es un buen ejemplo de estas acciones, siendo los Consejos Sectoriales de Biotecnología (MIEM, 2010) y Forestal (MIEM, 2012), los más ilustrativos a los efectos de este trabajo.

En este mismo marco, resaltan también las acciones de la OPP por constituir un primer esfuerzo de sistematización en bioeconomía, aplicada a las cadenas de la madera del país (OPP, 2018). En los últimos años, la OPP incluyó explícitamente la cadena de la madera en la elaboración de la Estrategia Nacional de Desarrollo ya mencionado, con un ejercicio específico de prospectiva con horizonte 2050, aplicado al sector forestal uruguayo. En este marco, el objetivo de la bioeconomía forestal al 2050 se describe como “definir oportunidades tecnológicas, de mercado y de capacidades en el sector, para mantener su crecimiento a la vez que se agrega valor a lo largo de las diferentes etapas de la cadena de valor”.

En investigación, desarrollo e innovación, la creación de un fondo sectorial para la energía por ANII permitió la consolidación de núcleos de generación de conocimiento e innovación a través del financiamiento de proyectos de investigación con participación de instituciones públicas y privadas (ANII, 2019).

En el sector privado, el desarrollo actual del sector forestal en Uruguay permite asociar, teóricamente, varios de sus aspectos a puertas de entradas de la bioeconomía en diferentes etapas de producción y transformación de sus cadenas de valor. En la fase de producción, el manejo forestal sustentable de las plantaciones, su eco-certificación y la adopción de un código de buenas prácticas incluyen de por sí numerosos aspectos relacionados directa e indirectamente a la bioeconomía. En la fase de transformación, la cogeneración de bioenergía generalizada hoy en día en las grandes empresas forestales sobresale como el mayor componente relacionado a la bioeconomía, al contribuir al reciclaje de residuos forestales y, en cierta forma, al secuestro de carbono, constituyéndose además en una medida de mitigación del cambio climático. La producción de bioenergía fomenta también diferentes formas de coordinación entre sector público y privado. El sector forestal registró avances interesantes en este campo. Sin embargo, estos puntos de entrada no aseguran, per se, una comprensión del modelo de bioeconomía y tampoco significan su incorporación activa en el quehacer del sector.

Con relación al monte nativo, la reciente elaboración de su estrategia nacional (Dirección General Forestal-DGF-, MGAP, 2018), plantea una serie de medidas para la protección y el uso sostenible de sus recursos naturales renovables, abriendo campos para su potencial asociación a políticas nacionales de bioeconomía. En línea con estas políticas estratégicas del gobierno, se iniciaron trabajos de investigación pioneros en el país, relacionados a la bioprospección de la biodiversidad del monte nativo para la obtención de biomateriales forestales de alto valor (Bennadji et al., 2014,2015,2019)



A modo de acercamiento a la identificación de oportunidades en bioeconomía para el sector, se presenta en la Tabla 1, una propuesta de clasificación de biomateriales forestal y sus estados de avances y aplicabilidad en el país.

Tabla 1: Clasificación de potenciales biomateriales forestales y sus estados de avance/aplicabilidad en Uruguay

Categoría	Tipo	Estado de avance/aplicabilidad
Energía	Bioethanol	Si (estudios de factibilidad)
	Biogas	Si (estudios de factibilidad)
	Leña	Si (uso comercial)
	Pellets	Si (Uso comercial)
	Carbón	Si (uso comercial)
Química	Plataformas de productos químicos verdes	No (Asociadas a plantaciones) Si (Incipientes en el monte nativos)
	Biofármacos	No
	Bioplásticos	No
	Nutraceuticos	No
	Cosméticos	No
Biocompuestos	Envases/embalajes funcionales	No
	Materiales de construcción	Si (escala comercial)
	Componentes de vehículos	No
Papel	Envases inteligentes	No
	Productos de higiene	Si (escala comercial)
	Papel inteligente	No
Textiles	Biofibras	No
	Industriales	No
	Interior	No
	vestimenta	No
Madera sólida	Interior	Si (Escala comercial)
	Muebles	Si (Escala comercial)
	Estructural de construcción	Si (Escala comercial)

Fuente: Elaboración propia

En suma, al comparar el contenido de la tabla 1 con el de la pirámide de la bioeconomía mencionada anteriormente se observa que el subsector madera sólida en Uruguay está aún concentrado en las fases de menor sofisticación y valor. Queda clara de esta comparación la importante tarea de la EB para lograr generar planes concretos para aprovechar las oportunidades existentes.

4. CONCLUSIONES

En el caso del Uruguay, varias iniciativas relacionadas a la bioeconomía empezaron a gestarse desde el 2010, destacándose la temática de bioenergía. En los últimos años, la sistematización de los esfuerzos fue fruto de acciones de la OPP en torno a la cadena de la madera, más específicamente la de la producción de celulosa.

Actualmente existen importantes esfuerzos de parte del gobierno para llevar adelante una EB que logre el aprovechamiento de las oportunidades existentes para conformar un



complejo productivo dinámico y generador de externalidades para el resto de la economía.

En el sector forestal, los abordajes de la bioeconomía y sus relaciones con la cadena de la madera en general y de los productos madereros en particular son incipientes en los ámbitos público y privado y se caracterizaron, hasta la fecha, por iniciativas y acciones motrices del estado y de centros de investigación, siendo la participación privada por lo general posterior.

Los mayores logros públicos-privados se han registrados hasta la fecha en el uso de la biomasa forestal para la producción de bioenergía y en la creación de institucionalidad y de capacidades en torno a la cadena de producción de la celulosa. No hay avances significativos en productos madereros sólidos fuera de la iniciación de algunas escasas líneas de investigación y de la generación de información y conocimiento en biomateriales forestales.

Por su carácter multisectorial y multidisciplinario, la bioeconomía ofrece múltiples opciones y oportunidades para el sector forestal en Uruguay y para todas las etapas de las cadenas de la madera. Sin embargo, estas no son viables sin sólidas políticas gubernamentales de respaldo, recursos para la investigación y capitales de riesgo para su concreción en la fase de transformación de las cadenas de la madera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII). Fondo sectorial de Energía. <https://www.anii.org.uy/apoyos/innovacion/50/fondo-sectorial-energiainnovacion/>

Bennadji, Z.; Ferreira, F.; Castillo, D.; Alfonso, M. 2014. Desarrollo de estrategias para la valorización de la flora arbórea nativa del Uruguay: de la bioprospección a la biorefinería. Revista INIA, 2014, No. 39, p. 57-61.

Bennadji, Z.; Ferreira, F.; Panizzolo, L. 2015. Biomateriales Forestales: Productos, Tecnologías, Cadenas de Valor y Mercados. Simposio Internacional. Serie de Actividad 749. INIA Tacuarembó, 25 de junio. ISSN: 1688-9258. 17p.

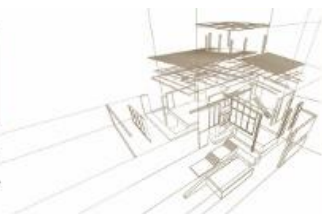
Bennadji, Z.; Olivaro, C.; Ferreira, F.; Panizzolo, L. 2019. Biomateriales Forestales. Jornada Técnica. Serie de Actividad 790. INIA Tacuarembó, marzo 2019. ISSN: 1688-9258. 16 p.

BMEL (German Federal Minister of Food and Agriculture), 2014. National Policy Strategy on Bioeconomy. www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/NatPolicyStrategyBioeconomy.pdf?__blob=publicationFile

Dirección General Forestal (DGF, MGAP). 2018. http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/estrategia_nacional_de_bosque_nativo.pdf

EC. 2012. Innovating for Sustainable Growth - A Bioeconomy for Europe" (2012). <http://www.bio-step.eu/background/what-is-bioeconomy/>

European Commission. 2012. Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. ISBN 978-92-79-25376-8. doi 10.2777/6462. 64 p.



European Commission. 2019. What is bioeconomy.

<https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/index.cfm>

European Commission. 2019. Top 20 innovative bio-based products Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. PDF ISBN 978-92-76-03420-9 doi: 10.2777/85805 KI-02-19-301-EN-N.298 p

International Advisory Committee on Bioeconomy (IACB), 2015.

https://gbs2015.com/fileadmin/gbs2015/Downloads/Communique_final.pdf

Laineza, M.; González, J.M.; Aguilar, A.; Vela, C. 2018. Spanish strategy on bioeconomy: Towards a knowledge based sustainable innovation. *New Biotechnology* 40 (2018) 87–95

McCormick, K.; Niina Kautto, N. 2013. The Bioeconomy in Europe: An Overview . *Sustainability* 2013, 5, 2589-2608; doi:10.3390/su5062589

MIEM. Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2010.

https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/plan_sectorial_biotechnologia.pdf

MIEM. Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2012.

https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/plan_sectorial_forestal.pdf

MINCYT. 2017. Bioeconomía Argentina.

<http://www.bioeconomia.mincyt.gob.ar/bioeconomia-argentina/>

OECD, 2009. The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda. Main findings and policy conclusions.

<https://www.oecd.org/futures/longtermtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>

OPP. Oficina de Planeamiento y Presupuesto. 2018. Hacia una Estrategia Nacional de Desarrollo. Avances del proyecto bioeconomía forestal 2050. Serie de divulgación - Volumen IX. Dirección de Planificación Oficina de Planeamiento y Presupuesto. 66 p.

Overbeek, G., de Bakker, E., Beekman, V., Davies, S., Kiresiewa, Z., Delbrück, S., Ribeiro, B., Stoyanov, M., Vale, M., 2016. Review of bioeconomy strategies at regional and national levels. BioSTEP.

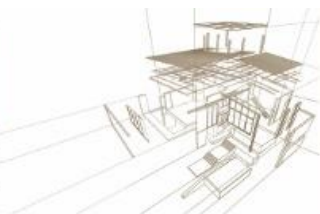
http://biostep.eu/fileadmin/BioSTEP/Bio_documents/BioSTEP_D2.3_Review_of_strategies.pdf

Sathre, Roger and O'Connor, Jennifer. 2010. Meta-Analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution. *Environmental Science and Policy* 13(2): 104–14.

Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación de España, 2016a. The Spanish Bioeconomy Strategy: Horizon 2030. Spanish Ministry of Economy and Competitiveness. <http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102159>

Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación de España, 2016b. The Spanish Bioeconomy Strategy: Horizon 2030. The 2016 Bioeconomy Action Plan. Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

<http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102157>



ENCADENAMIENTO PRODUCTIVO PARA LA ASOCIATIVIDAD DE ASERRADEROS PYMES, BASADO EN DISEÑO DE PRODUCTOS

PRODUCTION CHAIN FOR ASSOCIATIVITY BETWEEN SMEs SAWMILL, BASED ON PRODUCTS DESIGN

Ramos, Mario ⁽¹⁾ *; Gatica, Francisco ⁽²⁾; Rebolledo, Alonso ⁽³⁾; Rosales Víctor ⁽⁴⁾

⁽¹⁾Dr. Ing. Depto. de Ing. en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile

⁽²⁾Dr. Depto. de Economía, Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile

⁽³⁾Académico. Depto. de Diseño, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile

⁽⁴⁾Académico. Depto. de Ing. en Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío., Concepción, Chile

*Contacto: mramos@ubiobio.cl

Resumen

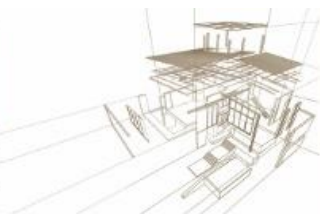
El desarrollo de muchos territorios está estrechamente ligado a las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs), especialmente en aquellos lugares donde las actividades productivas se basan en recursos naturales. Aquí, la oferta de las empresas alcanza solo el mercado local y difícilmente poseen una gran sofisticación de productos. Estas empresas raramente exportan. La experiencia comparada muestra que aquellos territorios con empresas altamente conectadas en encadenamientos de empresas de tamaño homogéneo son capaces de aprovechar las diferencias de costos y pueden actuar coordinadamente. El sector forestal chileno está altamente concentrado y pocas empresas controlan la oferta de materia prima. En este contexto, la asociatividad de PYMEs madereras en encadenamientos estratégicos dentro la cadena resulta relevante. Este trabajo presenta los resultados de un proyecto tendiente a fortalecer el ecosistema empresarial. A través de una serie de acciones se probaron modelos de asociatividad basados en el desarrollo de productos de mayor valor agregado contributivos a la bioeconomía territorial. Los resultados indican que un encadenamiento sostenible es posible siempre que existan condiciones de simetría entre ellos, una cultura de colaboración y productos de mayor complejidad con demanda potencial de mercado que aleje a las PYMEs de la dependencia de una gran empresa tractora.

Palabras-clave: Encadenamiento productivo, bioeconomía, aserraderos, PYMEs, diseño.

Abstract

The economy of many territories is closely linked to Small and Medium Enterprises (SMEs), especially in places where productive activities are based on natural resources. Here, companies offer only to the local market and the sophistication in their products is low. These companies rarely export. The experience shows that territories with highly connected companies in productive chains (companies of size homogeneous) are able to take advantage in costs. The Chilean forestry sector is highly concentrated and few companies control the raw materials offer. In this context, to associate SMEs in strategic chains is relevant. This work presents, from a diagnosis of 50 sawmills of Biobío Region-Chile, the results tending to strengthen the business ecosystem. Models of associativity based on the development of products were analyzed. The objective was to contribute to the territorial bioeconomy. Results indicate that a sustainable chain is possible if some conditions are possible: symmetry between enterprises, culture of collaboration and more complex products with potential market to move SMEs away from the dependence of large tractor companies.

Keywords: Production chain, bioeconomy, sawmills, SMEs, design.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Encadenamiento productivo

El desarrollo económico de muchos territorios está estrechamente ligado a las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs), especialmente en lugares donde las actividades productivas se basan en los recursos naturales. En estos casos sólo se alcanza a llegar al mercado local y difícilmente abordan productos más sofisticados.

En la literatura el encadenamiento productivo se entiende como: enlaces entre empresas que componen cada etapa o eslabón de un determinado proceso productivo o cadena de valor, con el fin de que estas empresas ganen competitividad en los mercados. En estas cadenas se producen transacciones de input-output intermedios entre unidades productivas, constituyendo una alternativa a la integración vertical o la internalización de las actividades productivas bajo un mismo control de la propiedad. En este contexto existen tres tipos teóricos de estructuras productivas en el territorio, a saber: Piramidal, Horizontal y Enclave (Figura 1).

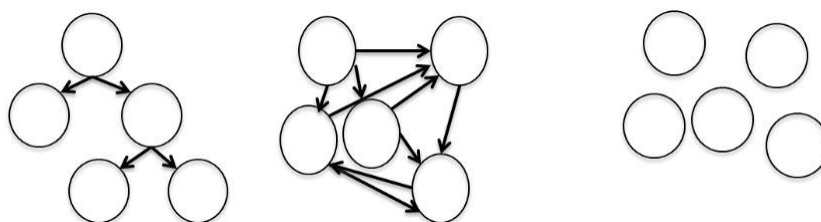


Figura 1: Tipos teóricos de estructuras productivas en el territorio, a partir de Scott (1998), Storper and Harrison (1994)

Las características del encadenamiento del tipo piramidal son la diferencia de los poderes de negociación y la búsqueda de la eficiencia dentro de la cadena, siendo clave la optimización de cada eslabón y la presencia de confianzas intermedias lo que obliga la presencia de contratos y el aprovechamiento en los costos de producción. Su expresión más paradigmática son las cadenas globales de producción -p.ej. automóviles-, al respecto puede revisarse a Scott (1998).

En la estructura horizontal se da una integración equitativa y se facilita la producción local con bajos costos de interacción, presentando muy altos niveles de confianza lo que facilita la existencia de equilibrios en los poderes de negociación, con ausencia de contratos, lo que permite alcanzar flexibilidad y economías. En su vertiente más territorial tenemos los Distritos Industriales Italianos (Storper y Harrison 1994).

Por último, están los enclaves, unidades asiladas de producción vinculadas solo por oferta y demanda, existiendo una desconexión y aislamiento. Aquí, pueden existir bajos



costos de producción, pero la falta de vinculación estrategia de largo plazo genera falta de competitividad y posible salida del mercado. La ausencia de redes entre empresas enclaves se produce en situaciones de alta desconfianza o en cadenas productivas centradas en las economías de escalas con cadenas largas y continuas de producción.

En sectores económicos con presencia de empresas grandes que actúan como “tractoras”, las estructuras verticales piramidales se comportan de manera eficiente, sin embargo, amedida que se desciende en la pirámide productiva aumenta la vulnerabilidad empresarial, presentando menores poderes de negociación y menores rentabilidades. Si las PYMEs no están especializadas, tendremos una relación aún más es asimétrica, pudiendo salir rápidamente de la cadena.

1.2. El sector forestal chileno

El sector forestal industrial chileno exhibe rasgos monopólicos y monopsonicos (3 empresas exportan el 73% de la madera aserrada). Pocas empresas poseen una gran oferta y demanda: la demanda ejerce un control hacia “atrás” y hacia el “lado”, y la oferta ejerce un control hacia adelante por la propiedad de la materia prima (trozas). Esto último se verifica fuertemente en los territorios “forestales”.

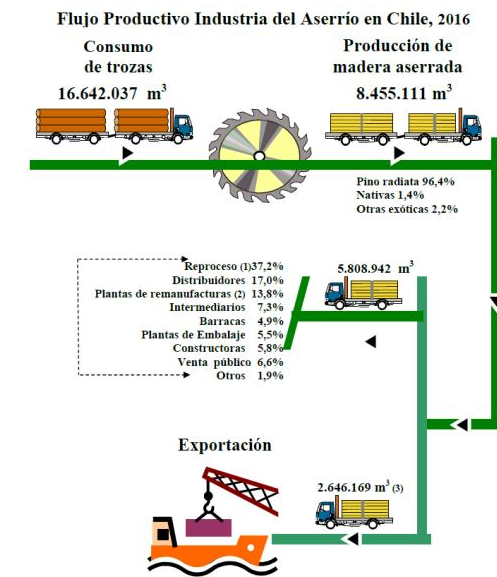
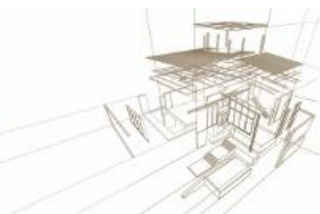


Figura 2: Industria del aserrío en Chile (Fuente: INFOR 2017)

Según datos del Instituto Forestal (INFOR 2017), 21 de 457 Aserraderos producen el 59,8% de la madera y 14 aserraderos pertenecen a dos empresas, produciendo el 68% del total de madera en Chile. Solo 3 empresas exportan el 73%. Desde la región del Biobío se producen 4.346.749 m³, esto es el 51,4 % del total en Chile.



En este contexto, los encadenamientos estratégicos resultan relevantes, especialmente para PYMEs productoras de madera aserrada o elaborada. En efecto, la existencia de pirámides homogéneas orientadas al valor agregado podría activar un encadenamiento virtuoso, generando un poder de compra competitivo ante el oferente de trozas. Esto requiere asociatividad estratégica para asegurar un flujo de producción rentable y sofisticado.

1.3. Modelo de encadenamiento productivo territorial

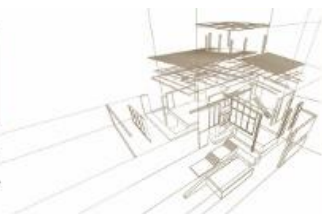
Este trabajo presenta los resultados de un proyecto público-privado tendiente a fortalecer el ecosistema empresarial de un territorio específico de fuerte vocación forestal con un importante tejido industrial PYME. A través de una serie de acciones, se probaron modelos de asociatividad basados en el desarrollo de productos de mayor valor agregado contributivos a la bioeconomía territorial entendida como la sustentabilidad de un territorio geográfico basado en sus recursos naturales. Wohlfahrt et al. (2019) definen la bioeconomía territorial como un sistema caracterizado por la presencia de una o más cadenas de valor bio-basadas destinadas a reemplazar recursos no renovables. Este sistema incluiría: i) producción, uso y reciclaje de biomasa dependiente de redes locales y globales y ii) un sistema local de actividades relacionadas con la gestión de los recursos naturales y el desarrollo socioeconómico.

Por su parte, Falabella y Gatica (2014) identifican tres rasgos que determinan, en este caso, el desarrollo del binomio cadena-territorio.

- Un elemento que condiciona las posibilidades de desarrollo es la alta concentración de la propiedad del suelo en pocas compañías, dificultando los procesos de diversificación. El actual marco de incentivos apunta al desarrollo concéntrico hacia atrás de la cadena de valor, permitiendo el mayor control de la propiedad del bosque.
- Debido a la alta concentración en la propiedad forestal, se produce una mayor lejanía entre los actores territoriales y la gerencia de la empresa.
- Existen asimetrías en las posiciones estratégicas en función de la parte de la cadena de valor más cotidiana. La percepción que tiene cada habitante está condicionada por la “parte” o el eslabón de la cadena que le es más cotidiana.

Se planteó, en este trabajo, la hipótesis de que una bioeconomía territorial basada en el encadenamiento es posible siempre que existan condiciones de simetría entre los actores, una cultura de colaboración y una orientación a productos de mayor complejidad con demanda real de mercado que aleje a las PYMEs de la dependencia de una gran empresa tractora. La experiencia se aplicó al territorio de la provincia de Arauco, de la región del Biobío, el que se caracteriza más adelante.

2. METODOLOGIA



El desarrollo del proyecto se abordó en dos etapas. Primero, se realizó un estudio de campo para establecer un diagnóstico de las capacidades productivas y la actitud empresarial hacia el encadenamiento productivo. Se consultó a todas las empresas PYMEs madereras de un territorio específico registradas como tales por las agencias públicas. respondieron la encuesta a 49 empresas de la provincia de Arauco, región del Biobío-Chile. Segundo, se seleccionaron 25 empresas en función de su complementariedad productiva y proactividad a la asociatividad y encadenamiento. Las empresas fueron llevadas a escenarios de cooperación y de desarrollo de productos de valor agregado. La segunda etapa consistió en un enfoque basado en el desarrollo de productos: levantamiento de ideas, selección y desarrollo del producto hasta su modelo de encadenamiento.

El desarrollo de producto se realizó con la siguiente metodología:

- Realización de talleres de actualización técnica y visualización de nuevas tecnologías en torno a los productos forestales, incluyendo oportunidades mercado y vinculación a entidades de conocimiento (a la Universidad Bío-Bío).
- Talleres de generación de ideas de productos. En una primera fase, se recogieron más de 100 ideas de productos posibles de fabricar por empresas en conjunto.
- Las ideas fueron rankeadas según los siguientes criterios: uso de la madera, posibilidad de mercado, participación de al menos 3 empresas y nivel de valor agregado. El ranking lo realizaron los empresarios y los expertos monitores del proceso, preseleccionando un conjunto de 15 iniciativas.
- Reuniones de trabajo con las empresas para seleccionar 5 prototipos de los cuales uno se fabricaría.
- Para todos los prototipos se realizaron planos de conjunto constructivos. Este trabajo lo realizaron expertos del proyecto, teniendo en cuenta las posibilidades técnicas instaladas en las empresas PYMEs madereras.
- Finalmente, para cada uno de los 5 productos se elaboró un modelo de encadenamiento asumiendo un supuesto de volumen de producción no unitario.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. PYMES madereras de la provincia de Arauco: diagnóstico

La provincia de Arauco se ubica en el sur-poniente de la región del Biobío y se caracteriza por su actividad forestal, agrícola y pesquera. Es una de las provincias con altos índices de pobreza y que, por su condición geográfica, se ha encontrado

débilmente conectada a otras provincias, siendo definida como uno de los territorios forestales de la región del Biobío (Figura 3).

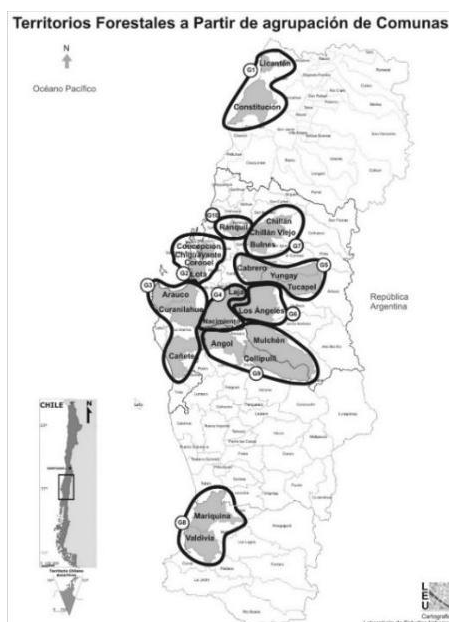


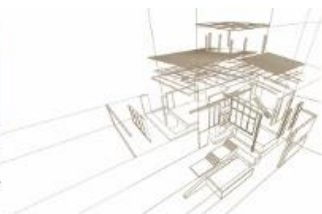
Figura 3: Territorios forestales de la región del Biobío (Gatica 2012)

Con una alta proporción de población mapuche, principalmente en las comunas del sur de la provincia, en los últimos años se ha observado un creciente conflicto por la propiedad de la tierra, cuestión que podría estar afectando el desarrollo económico y social del territorio. En la provincia de Arauco existe el 10,8% plantaciones de pino del país y 4 aserraderos producen más del 90% de la madera aserrada.

Las empresas PYMEs madereras de la provincia se encuentran en los inicios de la cadena de valor del sector forestal, salvo una pocas que han incursionado en productos de mayor valor. La gran mayoría realiza actividades de transformación primaria (Tabla 1)

Tabla 1: Actividades principales de PYMEs madereras provincia de Arauco (Una PYME puede realizar más de una actividad)

Actividad	Cantidad	%
Aserradero	45	44
Secado	9	9
Impregnación	7	7
Transporte	9	9

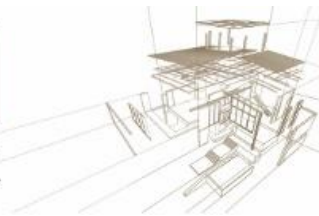


Transformación secundaria	11	11
Productos de la construcción	9	9
Viviendas	6	6
Muebles	2	2
Embalajes	2	2
Tableros	2	2
	102	100

En general, se trata de empresas que emplean en promedio 10,6 trabajadores por empresa y trabajan a un turno. El nivel tecnológico es básico, con máquinas y equipos en cierto nivel obsolescencia, pero suficiente para las operaciones productivas de productos con demanda y venta, esencialmente en las comunidades en que se encuentran localizadas las plantas. El diagnóstico permitió concluir:

- Bajo nivel de contenido tecnológico, con máquinas y equipos en cierto nivel obsolescencia, sin descortezado, ni secado.
- Madera en trozas representan el principal insumo
- 92% abastecimiento de terceros
- Proveedores son PYMEs locales
- Productos de bajo nivel de valor agregado, centrados en transformación primaria
- Muchas empresas expresan disposición de trabajo conjunto y lograr nuevas tecnologías
- Escaso vínculo con grandes empresas

Las características del mercado forestal chileno se acentúan en Arauco donde 4 aserraderos producen el 94% de la madera aserrada de la provincia. Este nivel de concentración se correlacionaría directamente con la propiedad de los bosques en muy pocas empresas. Este escenario presenta un tejido PYME dependiente del abastecimiento de materia prima. A partir de la fuerte concentración, el análisis establece las PYMEs actúan de manera aislada con bajo nivel de sofisticación, orientadas al mercado local y con abastecimiento en el mismo territorio desde otras PYMEs y grandes proveedores.



Hoy, la vocación productiva de la provincia de Arauco está centrada en los recursos agrícolas, forestales y el etno-turismo, sin embargo, en el sector forestal el desarrollo de la PYMEs es complejo. En efecto, la gran producción industrial altamente tecnificada compite por calidad y costos, con economías de escala y abastecimiento prácticamente asegurado.

3.2. Enfoque en el desarrollo de productos. Caso: Kit de emergencia

La propuesta fue validada en torno al desarrollo de productos con valor agregado capaces de ser producidos por un conjunto de empresas. Se supuso que el conocimiento técnico y gerencial existe o podría ser adoptado en el corto plazo y que la disponibilidad de máquinas y estándares podría ser alcanzado con apoyo de proyectos de fomento, especialmente la disponibilidad y acceso a capacidad de secado industrial de madera.

Dada la continua dificultad de proveer abrigo a los ciudadanos víctimas de catástrofes naturales (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, o incendios forestales) muy presentes en Chile, las viviendas de emergencia y su implementación son un requerimiento primario. Por ello, dos de los prototipos apuntaron a una vivienda industrializable y un kit de muebles en base a madera. Presentamos, a modo de ejemplo, el kit de emergencia desarrollado y constituido de 4 camas, una repisa o estante, una mesa y 4 sillas para alhajar la vivienda de emergencia.

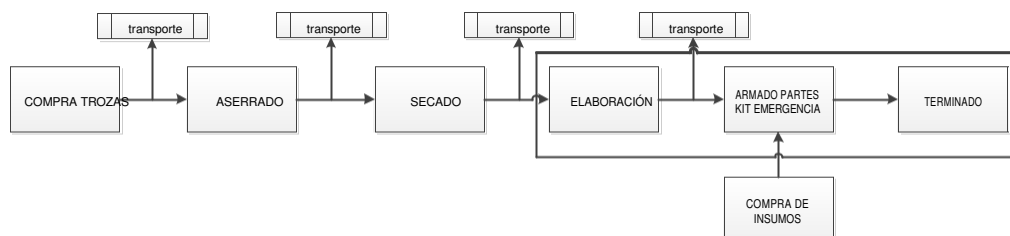
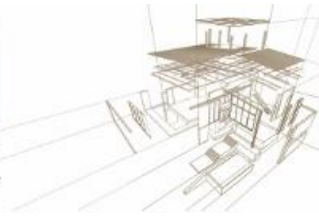


Figura 4: Diagrama de flujo del proceso de fabricación del kit de emergencia

En el modelo de encadenamiento, el proceso de fabricación comienza con la compra de trozas, las que son transportadas a un aserradero, luego se transporta a una instalación de secado y posteriormente a un proceso de elaboración. Las piezas definitivas son transportadas a la instalación de armado de los componentes del kit (Figura 4).

El encadenamiento productivo considera instalaciones de: aserrado, secado, cepillado y armado y terminado del kit de emergencia y transporte (logística) de madera. Para minimizar los costos de transporte el supuesto básico de esta propuesta es que todas las instalaciones se encuentren dentro de un área igual o menor a 50 kilómetros de distancia. De acuerdo a datos de diseño se necesitan $0,7 \text{ m}^3$ de madera seca cepillada para la fabricación de un kit de emergencia. Con esta información se calculó la cantidad necesaria para fabricar desde 25 a 100 kit de emergencia al mes. Para armar 100 kit de emergencia al mes se requieren 70 m^3 de madera aserrada. Al contrastar con la capacidad de producción promedio de un aserradero de 350 m^3 al mes, basta con sólo una unidad productiva para cumplir con el requerimiento, además de un equipo de 20



trabajadores. Los diagramas de conjunto de los productos se muestran en las Figuras 5 y 6.

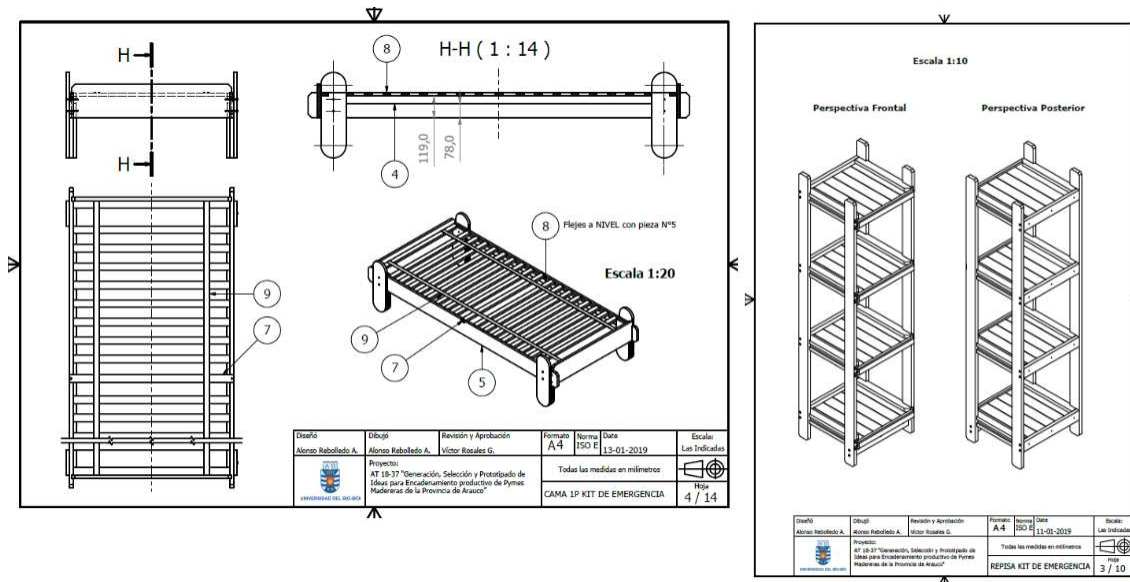


Figura 5: Diagrama de conjunto cama y repisa

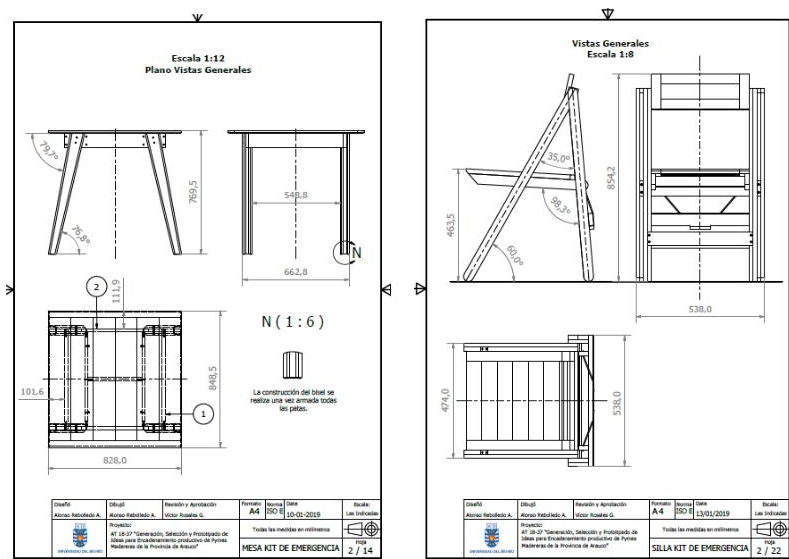


Figura 6: Diagrama de conjunto mesa y silla

3.3. Disponibilidad de las empresas a asociarse para el encadenamiento

Por último, luego de la experiencia del proyecto y del trabajo piloto llevado adelante, se aplicó una encuesta a las empresas (23 respondieron) sobre la voluntad de asociarse y



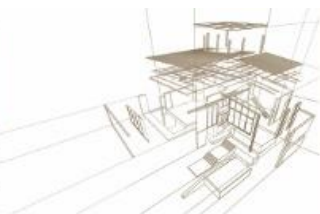
las ventajas y desventajas de agruparse para mejorar la competitividad. Las preguntas fueron:

- La asociatividad empresarial podría traer beneficios a su empresa, puede señalar que beneficios ve Ud. Marque solo tres preferencias. Si no ve ningún beneficio, no responda esta pregunta.
- ¿Cuáles cree Ud. son las trabas para asociarse con otros empresarios? (marque un máximo de tres preferencias)
- ¿Cuáles cree Ud. que serían los incentivos para asociarse? (marque un máximo de tres preferencias)

Tabla 2: Respuesta sobre beneficios de la asociatividad

Ítem	Mención	%
Negociar con clientes y vender de manera conjunta	8	31%
Capacitación conjunta	5	19%
Buscar nuevos mercados	4	15%
Disminuir costos de proveedores	3	12%
Aprender del otro	2	8%
Disponer de equipos comunes	1	4%
Comprar juntos	1	4%
Mantenimiento de equipos compartida	1	4%
Crear redes	1	4%
Total	26	100%

Ante la pregunta sobre los beneficios que la asociatividad puede traer, negociar con clientes, capacitación conjunta, búsqueda de mercados tiene las tres primeras preferencias (ver Tabla 2). Respecto a las trabas para asociarse con otros empresarios, la desconfianza y el ponerse de acuerdo ocupa los dos primeros lugares. Estas respuestas son muy reveladores, pues en la provincia existe un conocimiento mutuo y la falta de confianza es fundamental para el proceso de asociatividad. En relación a los incentivos para asociarse, la existencia de un potencial ocupa el primer lugar. Este punto fue verificado en muchas ocasiones. Un negocio potencial, una oportunidad de mercado



puede gatillar en los empresarios la necesidad de buscar socios, pero subsanando el problema de la desconfianza.

4. CONCLUSIONES

El desarrollar nuevos encadenamientos es un mecanismo eficiente para que los territorios basados en la bioeconomía puedan ser competitivos. Sin embargo, la presencia de grandes empresas dificulta el desarrollo de las PYMEs. Las pequeñas empresas deben, por ello, especializarse y buscar aquellos espacios o nichos que no ocuparan las grandes compañías.

En Chile, el sector forestal es un mercado muy concentrado. Para el caso de estudio, la provincia de Arauco de la región del Biobío, la concentración del mercado y el “aislamiento geográfico” son trabas al desarrollo empresarial de pequeño tamaño. Por tratarse de condiciones difíciles de competitividad, la desconfianza entre empresas y la falta de nuevos negocios entran la asociatividad y el encadenamiento productivo.

En este escenario, las PYMEs deben especializarse y ser complementarias a las grandes empresas “tractoras”, siendo la asociatividad un factor gravitante que puede facilitar encadenamientos estratégicos. En la pirámide traccionada por una gran compañía, la PYME debería ocupar nichos de especialización con productos específicos no abordados por la empresa tractora.

El piloto llevado adelante demuestra que el desarrollo de nuevos productos es un camino para modelos de encadenamiento de tipo clúster. Aquí, las empresas se deberían apoyar en actores de mayor nivel tecnológico para suplir deficiencias y proveer componentes no factibles de producir por el clúster. Las asimetrías de nivel tecnológico entre PYMEs es un factor en contra al momento de buscar asociatividad.

Se trata de incentivar a las PYMEs a asociarse en torno a productos con demanda potencial en el mercado no solo local sino nacional e internacional. Los productos sofisticados en base a madera son variados y se espera en el futuro un crecimiento en su demanda. Estaría allí la posibilidad de desarrollo de empresas PYMES de bioeconomías territoriales. Se debe profundizar la prospectiva de mercado y canales de comercialización y considerar los aspectos logísticos como el transporte y el acceso a clientes. Para ello, es fundamental cultivar una confianza interempresa y disponer de gestores de articulación capaces de situarse por sobre los intereses individuales y buscar el beneficio de los asociados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Asociación de Industriales de la Madera de Arauco por su colaboración y participación, a CorpArauco como socio estratégico del proyecto conjunto con la Universidad del Bío-Bío y al Comité de Desarrollo Productivo Biobío-CORFO por el auspicio y apoyo.

Este trabajo ha sido apoyado por el Grupo de Investigación en Industria Inteligente y Sistemas Complejos de la Universidad del Bío-Bío 195212 GI/EF.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Falabella G. and Gatica F. (2014). The forestry and cellulose sector in the Province of Concepción, Chile: Production linkages between the Secano Interior and industry in Greater Concepción, or an enclave economy? *Cepal Review*, N°112.

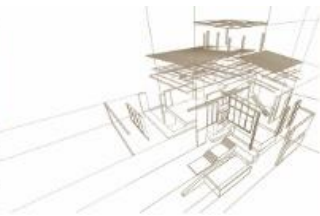
Gatica F. (2012). Prácticas empresariales con potencial de vinculación territorial: el caso de sector forestal chileno. *Revista de Geografía Norte Grande*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 52.

INFOR (2017). *La Industria del Aserrío*, Instituto Forestal INFOR, Chile.

Scott, A. J. (1998). *Regions and the World Economy: The Coming Shape of Global Production, Competition, and Political Order*. Oxford: Oxford University, USA.

Storper, M. y Harrison, B. (1994). Flexibilidad; jerarquía y desarrollo regional: Los cambios de estructura de los sistemas productivos industrial y sus nuevas formas de articulación del poder en los años 90. En: Benko, G. y Lipietz, A. *Las Regiones que ganan: Distritos y Redes. Los nuevos paradigmas de la geografía económica*. Valencia: Edicions Alfons El Magnanin. Generalitat Valenciana, España.

Wohlfahrt J., Ferchaud F., Gabrielle B., Godard C., Kurek B. , Loyce C. , Therond O. (2019). Characteristics of bioeconomy systems and sustainability issues at the territorial scale. *Journal of Cleaner Production* 232 pp. 898-909.



INFLUENCIA DE LA DENSIDAD EN LA BRIQUETA DE ESPECIES COMERCIALES

INFLUENCE OF DENSITY ON BRIQUETTING OF COMMERCIAL SPECIES

Myla 1 MedeirosFortes 1^{1*}, Ailton 2 Teixeira do Vale², Karine 3 Meira de Abreu 3³ Adrianna
4 Amorim de Sousa Pinto 4⁴ Macksuel 5 Fernandes da Silva 5⁵ Carlos 6 Roberto Sette Junior⁶

⁽¹⁾Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil

⁽²⁾Facultad de Ingenieríaforestal. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil

⁽³⁾Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto Federal de Rio verde. Rio verde, Brasil

⁽⁴⁾Facultad de Ingenieríaforestal. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil

⁽⁵⁾Facultad de Ingenieríaforestal. Universidad federal de Goiás. Goiânia, Brasil

⁽⁶⁾Facultad de Ingenieríaforestal. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil

*Contacto: [Myla Medeiros Fortes: medeirosmyla@gmail.com](mailto:medeirosmyla@gmail.com)

Resumen

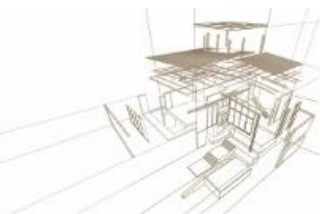
El proceso de briquetas surgió en 1848 a partir de un método patentado que convirtió el carbón pequeño en bultos sólidos por medio de presión y que hoy se utiliza para el aprovechamiento de los desechos generados en la industria agroforestal. El briquetaje consiste en la compactación con o sin aglutinante y objetivo la concentración de energía por unidad de volumen, la homogeneización con la consecuente facilitación en las operaciones de manipulación de combustible. El objetivo de este trabajo era evaluar el efecto de la densidad a granel de la materia prima sobre la aparente densidad sólida de las briquetas. Los residuos presentaban un contenido medio de humedad sobre una base seca del 12% y granulometría entre 20 y 40 de malla. Cinco briquetas fueron producidas por el tratamiento (especie) de 40 gramos en una máquina de briquetaje de laboratorio con una temperatura de 120 °C (+ o -5 °C), presión de 140 kgf.cm⁻², tiempo de compactación de 5 minutos y enfriamiento de 15 minutos con ventilación forzada. Los residuos de *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* y *Pinus elliotii* mostraron una densidad aparente de 422 kg.m³, 346 kg.m³ y 267 kg.m³, respectivamente. Las briquetas de *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* y *Pinus elliotii* mostraron una densidad aparente sólida de 1,216 kg.m³, 1,192 kg.m³ y 1,187 kg.m³, respectivamente. Con un 5% de probabilidad, la briqueta de *Dinizia excelsa* presentaba una mejor calidad que la densidad sólida, lo que refleja la cantidad de energía acumulada en la briqueta.

Palabras-clave: Briqueta, densidad, utilización de residuos.

Abstract

The briquetting process arose in 1848 from a patented method that converted small coal in solid lumps by means of pressure and that today is used for the harnessing of waste generated in agro forestry industry. The briquetting consists of the compaction with or without binder and objective the concentration of energy per unit of volume, the homogenization with consequent facilitation in the operations of fuel handling. The objective of this work was to evaluate the effect of bulk density of raw material on the apparent solid density of briquettes. The residues presented average moisture content on a dry basis of 12% and granulometry between 20 and 40 mesh. Five briquettes were produced by treatment (species) from 40 grams in a laboratory briquetting machine with a temperature of 120 °C (+ or -5 °C), pressure of 140 kgf.cm⁻², compaction time of 5 minutes and cooling of 15 minutes with forced ventilation. The residues of *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* and *Pinus elliotii* showed bulk density of 422 kg.m³, 346 kg.m³ and 267 kg.m³, respectively. The briquettes of *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* and *Pinus elliotii* showed solid apparent density of 1.216 kg.m³, 1.192 kg.m³ and 1.187 kg.m³, respectively. At 5% probability, the briquette of *Dinizia excelsa* presented with better quality than solid density, which reflects the amount of energy accumulated in the briquette.

Keywords: briquette, density, use of waste.



1. INTRODUCCIÓN

En Brasil, el área de biomasa de plantaciones forestales corresponde a 7.840.000 hectáreas, de los cuales 5,7 millones son de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus* 1,6 millones, que se utilizan en la pulpa y papel, paneles reconstituidos y madera contrachapada, madera aserrada y carbón vegetal (Ibá, 2017). Por otro lado es el uso común de las especies nativas de la Amazonía como el *Dinizia excelsa* Ducke, en la industria de la construcción, industria del mueble y paneles decorativos (Embrapa, 2004), con grandes volúmenes de residuos en el proceso (Pereira Júnior, 2001).

Estos residuos pueden utilizarse como fuente de energía y utilizan en la producción de biocombustibles sólidos tal como se hace en el proceso de compresión. El proceso de compresión es una eficiente forma de concentración de energía de la biomasa, de la densificación de residuos de la biomasa en briquetas que es una forma definida y con mayor valor comercial (Quirino, 1991).

Las briquetas son biocombustibles generados bajo densificados presión y control de temperatura (Silva, 2007) de residuos heterogéneos, a través del proceso de molienda, secado (Quirino, 2007). Que sin la eliminación adecuada puede contaminar el medio ambiente por deposición en lugares inapropiados, siendo esta una alternativa ambientalmente favorable a la utilización de los residuos.

La densificación aumentar densidad, reducir el contenido de humedad, reduce al mínimo la variedad de formas y tamaño de las partículas de residuos lignocelulósicos (Quirino, 2003). Los factores que influyen en la producción y calidad de briquetas son densidad, humedad y el tamaño de los residuos (Filippetto, 2008; Rodrigues, 2010). Así, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la densidad aparente de la materia prima sobre la densidad aparente de briquetas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización de biomasa

Caracterización de la biomasa se realizó utilizando residuos de madera de tres especies comerciales, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii*, *Dinizia excelsa* Ducke y fueron recogidos en las plantaciones en el distrito federal y en los aserraderos en el estado de Goiás- Brasil. Los residuos fue clasificado en cuanto a tamaño de partícula a través del tamiz de Agitador orbital con huelgas intermitentes. Humedad de la muestra se determinó sobre una base seca, por método gravimétrico, basado en Vital (1982). La densidad aparente se determinó según el NBR 6922/1981 (Abnt, 1981) de la relación entre la masa de la biomasa y el volumen conocido de un contenedor.

2.2. Producción y análisis de briquetas

Con los residuos clasificado granulométricamente y con la humedad enladrillado determinado y regulado, con 40 gramos, en un briquetadeira de laboratorio con el siguiente protocolo, definido en las pruebas preliminares: $140\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, temperatura de



120 ° C, tiempo de 5 minutos y la compresión de 15 minutos de enfriamiento con ventilación, por un total de cinco briquetas para tratamiento (clase) forzada.

La densidad aparente de briquetas se obtuvo por el método estereométrico, usando los datos de volumen y la masa de cada briqueta.

2.3. Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos (especies) y cinco repeticiones y los resultados de las pruebas fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) la probabilidad de 5% y, cuando se trataba de diferencias significativas entre medio, compararon por prueba Tukey.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados medios de las características de los residuos y briquetas de *E. grandis*, *P. Elliotti* y *D. Excelsea* Duke se presentan en la tabla 1. Los residuos presentaban un contenido medio de humedad en la base seca del 12% y granulometría entre 20 y 40 de malla. La densidad aparente de los residuos fue influenciada por el material genético, con valores medios de 422 kg. m⁻³, 346 kg. m⁻³ y 267 kg. m⁻³ para *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* y *Pinus elliotii* respectivamente, evidenciando que el *Dinizia excelsa*, con valores más altos que los encontrados por Ferreira (2017) en el valor 268,43 kg. m⁻³, probablemente influenciado por la granulometría del residuo. Esta característica fundamental es medir el volumen de objetos con forma irregular, que proporciona información útil para la logística y el transporte de los mismos, de forma que se estiman los espacios vacíos entre una partícula y proporcionan datos reales desde los volúmenes hasta el transporte (García et al. 2013).

La densidad aparente de las briquetas influyó en el material genético, con valores medios de 1.216 kg. m⁻³, 1.192 kg. m⁻³ y 1.187 kg. m⁻³ para *Dinizia excelsa* Ducke, *Eucaliptus grandis* y *Pinus elliotii* respectivamente. Con una probabilidad del 5%, la briqueta de *Dinizia excelsa* presentaba una mejor calidad y densidad sólida, lo que desató que las características de los residuos influyen en la producción y calidad de las briquetas (Filippetto, 2008; Rodrigues, 2010). El valor similar de *Dinizia excelsa* Ducke (1.140 kg. m³), fue observado por Costa Júnior (2017).

Definidos los parámetros del proceso de densificación (presión, temperatura, enfriamiento) los variables que influirán en la calidad del material son las características del residuo utilizado. El residuo de *Dinizia excelsa* permitió la producción de una briqueta de mejor calidad, así como una densidad sólida aparente. El aumento de la densidad de las briquetas representa una disminución en el volumen de biomasa residuales, proporcionando una mayor concentración de masa en el mismo espacio (Silva et al., 2015) y por lo tanto una mayor concentración de energía.

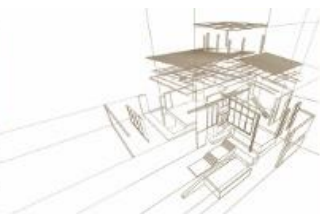


Tabla 1: Comparación entre los medios de las propiedades físicas de los residuos y las briquetas de *E. grandis*, *P. elliotti* y *D. Excelsea Duke*.

Especies	DA (kg.m ³) residuos	DA (Kg.m ³) briqueta
<i>E. grandis</i>	346 b	1.192 b
<i>P. elliotti</i>	267 c	1.187 b
<i>D. excelsea</i>	422 a	1.216 a

Obs: Promedios seguidos de la misma letra en la columna, no difieren entre sí por la prueba de Tukey ($p > 0.05$). DA: Densidad aparente.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron la eficacia del proceso de fabricación de briquetas de residuos lignocelulósicos de la transformación de las especies forestales. Entre los residuos lignocelulósicos analizados, que presentaron mayor densidad y por lo tanto mayor capacidad concentración sólida de energía por unidad volumen fue *Dinizia excelsa Duke*.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad de Brasilia y en el laboratorio de calidad bio-energía y la madera de la Universidad Federal de Goiás

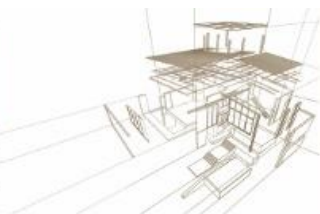
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6922. (1981). Carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica – (densidade a granel). Rio de Janeiro.

Costa Júnior, D. S.DA; Souza, E. C. ;Silva, S. I. DE. S. ;Interaminense, P. P. B. ; Pimenta, A. S. (2017). Caracterização física de briquetes produzidos a partir de resíduos de bambu (*Bambusavulgaris*) e serragem de angelim vermelho (*Dinizia excelsa Ducke*). II Congresso Internacional das Ciências.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004). Angelim Vermelho *DiniziaExcelsa*. Espécies arbóreas da Amazônia. Belém, 6p.

Ferreira, G. (2017). Viabilidade técnica da produção de pellets de resíduos de madeira das espécies *Dinizia excelsa Ducke* e *Manilkaraelata* (AllemãoexMiq.) Monach. para fins energéticos. Dissertação, Departamento de CiênciasFlorestais, Universidade Federal de do Espírito Santo. 54 p



Filippetto, D. (2008). Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 74p.

Garcia, D. P.; Caraschi, J. C.; Ventorim, G. (2013). Caracterização energética de pellets de madeira. Revista da Madeira, v. 135, p. 14-18.

Pereira Júnior, V. B. (2001). Alternativas para a cogeração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira. Energia na Agricultura, 17, 34.

Quirino, W. F. (1991). Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Quirino, W. F. (2003). Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA. 14p.

Quirino, W. F. (2007). Densificação de resíduos da biomassa. In: Workshop - Madeira Energética: Principais questões envolvidas na organização e no aperfeiçoamento do uso energético da lenha, Rio de Janeiro, Brasil.

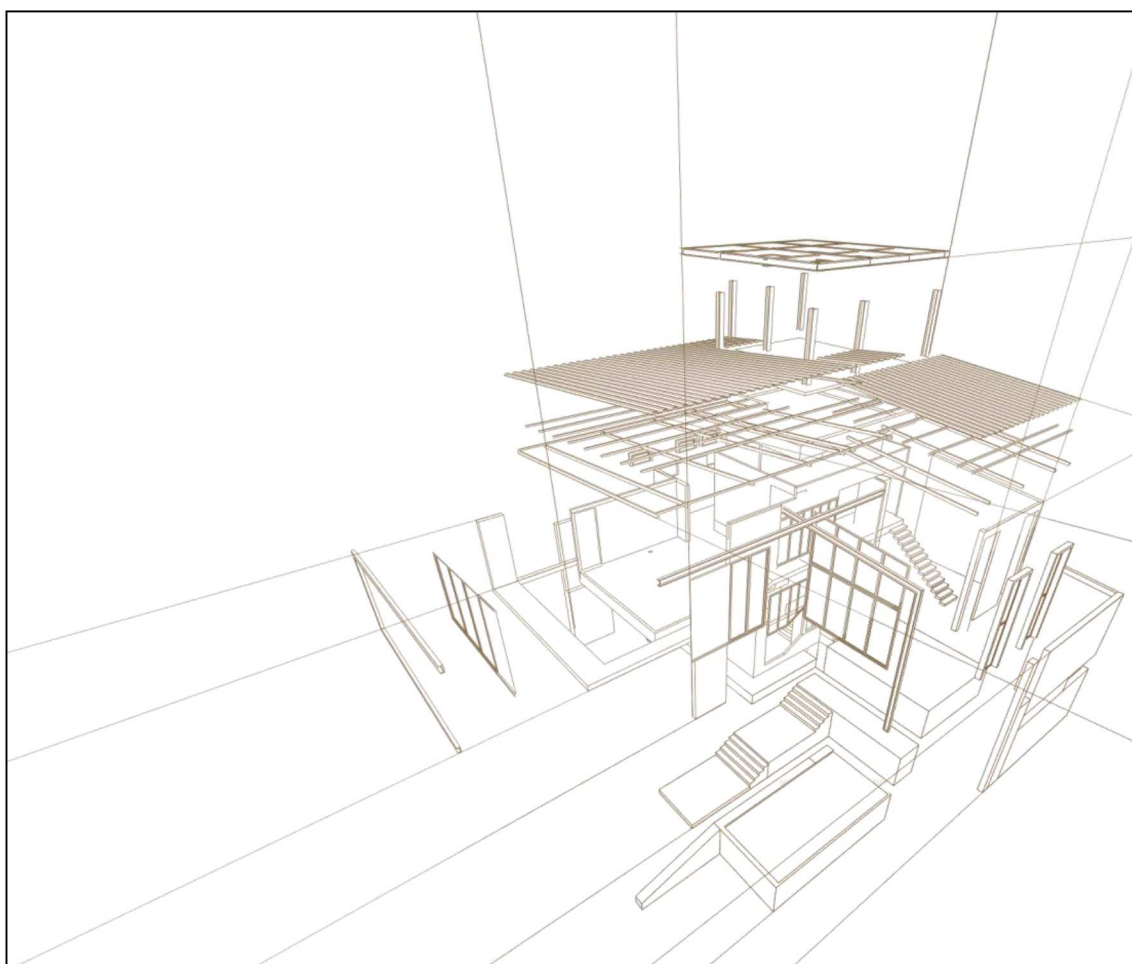
Rodrigues, V. A. J. (2010). Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem. Dissertação, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa. 117p.

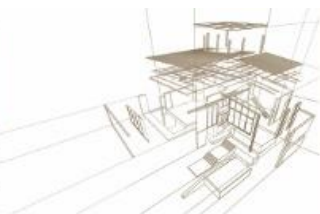
Silva, C. A. (2007). Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos. Dissertação, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 68p.

Silva, D.A.; Yamaji, F.M.; Barro, J.L.; Roz, A.L.; Nakashima, G.T. (2015). Caracterização de biomassas para a briquetagem. Revista Floresta, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 713 – 722..



VIII. Arquitectura en madera e industrialización de la construcción





ESTRUCTURAS EN MADERA DE MEDIANA ALTURA COMO MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

MID RISE WOODEN STRUCTURES AS IMPROVEMENT OF PRODUCTIVITY IN CONSTRUCTION

Ugarte, Juan José ^{(1)*}; Montaña, Jairo ⁽²⁾; Wiegand, Eduardo ⁽³⁾; Serra, Enric ⁽⁴⁾; Cárcamo, Sebastián ⁽²⁾; Delucchi, Christiane ⁽³⁾; Lagos, Jorge ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Arquitecto. Presidente de Corporación Chilena de la Madera. Santiago, Chile.

⁽²⁾ Ingeniero Civil Estructural. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽³⁾ Arquitecto. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽⁴⁾ Ingeniero Constructor Civil. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

* Contacto: jugarte@corma.cl

Resumen

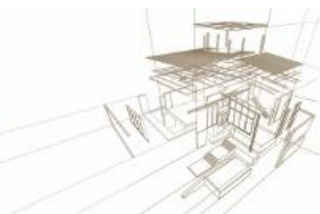
La productividad en la construcción presenta importantes rezagos comparando con otras industrias. En este contexto la madera ofrece importantes ventajas comparativas, ya que, a través de la construcción industrializada (off-site) y un montaje acelerado en terreno (on-site), puede permitir una mejora significativa en la productividad. Bajo la metodología del "diseño colaborativo", contando con simulaciones sísmicas y ensayos de laboratorio, se pudo innovar en la tipología modular (3D) de construcción en maderas. El sistema constructivo propuesto mejora el desempeño del sistema modular de 6 caras, el que provoca duplicaciones innecesarias de estructuras de muros y entre pisos, disminuyendo con ello la superficie habitable, elevando la altura de la edificación (por la duplicación de losas de cielos y pisos) y provocando con ello un sobrecosto. Se diseñó, fabricó y montó en terreno un edificio experimental a escala real de cinco pisos en marco-plataforma (entramado ligero) -por ser esta la tipología de mayor crecimiento en Chile- utilizando estructuras de madera en base a módulos prefabricados de sólo 4 caras. Se logró así optimizar el uso de los materiales, y aumentar la superficie libre de la planta arquitectónica sin incrementar innecesariamente la altura del edificio. Para ello se desarrollaron nuevos conectores para muros y entre pisos, se incorporó el sistema ATS para los esfuerzos sísmicos, e ideó un sistema de montaje que permitió realizar las conexiones desde el interior del edificio, sin necesidad de andamiajes exteriores. Con ello se obtuvo mejoras significativas en su desempeño de productividad, mejorando los indicadores durante el proceso de montaje en terreno.

Palabras-clave: Productividad, construcción, prefabricado, modular, edificios, madera, mediana altura.

Abstract

Unlike in other industries, productivity in construction presents an important delay. In this context, timber offers important comparative advantages, as the use of industrialized construction (off site) and accelerated assembly in field (on site) that can allow a significant productivity improvement. Under the methodology of "collaborative design" and the use of seismic simulations and laboratory tests, it was possible to innovate modular typology (3D) of timber construction. The proposed system improves the performance of the modular 6-faced system unit, which causes unnecessary duplication of wall and floors structures, decreasing this way the living space, raising the height of the building (due to ceiling and floors facing duplications) and causing additional costs. A six-story wood-frame full-scale experimental building -the fastest growing typology in Chile- was designed, built and assembled using prefabricated modules with only 4-faces. With these variations, it was possible to optimize the use of materials, and enhance the free architectural surface area without increase unnecessarily the total building height. To this end, new connectors for walls and floors facing were developed, ATS system was incorporated for seismic efforts, and an erection system was designed to allow the installation of connections from inside the building, without the need for external scaffolding. The outcome was significant improvements in productivity performance, improving the indicators during the assembly in field.

Keywords: Wood-frame prefabricated modular building, productivity performance.



1. INTRODUCCIÓN

En los años recientes instituciones públicas como privadas en Chile están en búsqueda y desarrollo de programas estratégicos que permitan impulsar el actual desempeño de la industria de la construcción en términos de su productividad. Se tiene que al evaluar los niveles de crecimiento operacionales de la construcción habitacional de Chile en las últimas décadas, las cifras indican que hay un vasto desafío en el camino de mejorar la productividad de esta industria (F. & García T. 2014). En este contexto aparece una oportunidad para la madera como una propuesta de solución al ser un material apropiado para ser industrializado.

El presente artículo tiene por objetivo realizar una descripción técnica de los procesos asociados a la construcción de una torre experimental prototipo de cinco pisos prefabricada en madera con el sistema marco plataforma denominada Torre Peñuelas ubicada en Valparaíso Chile, en este sentido se tendrán en consideración la revisión de los procesos y las experiencias registradas en cuanto a su prefabricación en planta; así como las labores relacionadas con el montaje de la estructura en terreno, para esto se tendrán en cuenta como input los tiempos de fabricación de las diferentes actividades a lo largo del proyecto, con lo que se realizará una evaluación general de la productividad en los procesos.

2. ANTECEDENTES

Chile con 14 millones de hectáreas en bosques nativos sumadas a 3 millones de hectáreas en plantaciones de las que proviene y se extrae madera industrial, se ha convertido en un país con una importante industria forestal que alcanza la segunda actividad económica en importancia de exportación, después de la minería. Sin embargo en comparación con otros países forestales productores, la construcción de viviendas en madera en Chile entre los 3 a 6 pisos es de tan solo un 0.3%, lo cual se debe a la existencia de varias brechas que se han ido enfrentando en los años recientes. Debido a lo anterior, no se cuenta con información sobre costos y procesos de producción asociados a estructuras en madera de mediana altura.

En este sentido el Centro de Innovación de la Madera (CIM), actual empresa conformada por la Universidad Católica de Chile (UC) y la Corporación de la Madera (CORMA) ha integrado a diferentes profesionales, entidades públicas y privadas para en conjunto desarrollar un sistema constructivo que sea sostenible en Chile. Con este objetivo, además de la búsqueda de generar proyectos que incentiven el uso de la madera, nace el proyecto de construcción de una torre experimental prefabricada en madera de cinco pisos más una terraza habitable denominada Torre Peñuelas (TP) Figura 1, la cual fue edificada con el sistema marco plataforma al ser el método de construcción más viable para la mayor parte de la industria de construcción local.

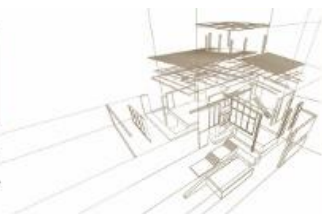


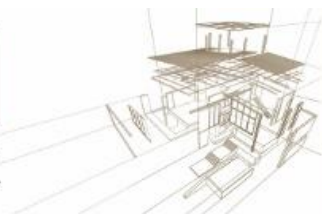
Figura 1: Torre Peñuelas (TP).

El objetivo de este proyecto es desarrollar investigaciones en relación con cuatro áreas principales como son: i) El comportamiento físico-ambiental relacionado con la transmitancia térmica, las demandas energéticas, la permeabilidad, las propiedades acústicas, entre otras; ii) El comportamiento sísmico mediante la instrumentalización por medio de acelerómetros; iii) La percepción inmobiliaria de empresas y consumidores acerca de los atributos de esta materialidad; y iv) La evaluación económica del sistema constructivo para uso habitacional.

El componente de innovación asociado a la Torre Peñuelas radicó en la aplicación de un sistema de módulos de 4 caras distintos a la construcción modular tradicional como se explicará más adelante, de igual forma; se implementó la utilización del sistema ATS (Anchor Tiedown System) por primera vez en Latinoamérica como tecnología para satisfacer el diseño estructural dado las regulaciones sísmicas chilenas para edificios. Como otras características adicionales, se tienen que el edificio cuenta con una fachada ventilada para el regular el comportamiento térmico, y paneles solares en su cubierta como fuente de energía.

La construcción de los módulos con 4 caras de este proyecto nace a partir de la necesidad de evitar la duplicación de paredes así como de las losas de cielo y piso, que la construcción modular apilada tradicional de 6 caras tiene asociada, en este sentido se desarrollaron módulos con base a 3 paredes y 1 techo (sistema de 4 caras), es decir se eliminó la cara de losa de piso, y una de las caras laterales. Esta modulización sin duplicar losas y muros cuando se apilan los módulos vertical y horizontalmente uno tras otro, reduce material (30% a 40%), gastos por el sobreuso de material (madera), gastos por Mano de Obra y gastos por tiempos de ejecución.

Constructivamente el proyecto consistió en si en varios desarrollos aplicables a los módulos y muros en el sistema marco-plataforma que permiten reducir costos en materiales, mano de obra y tiempos de fabricación en planta. Los fundamentos sobre los cuales se desarrolló la ingeniería del proyecto fue buscar que la torre contara con módulos de 4 paneles, que pudiera llevarse a terreno prefabricada al máximo considerando terminaciones interiores cercanas al 100% a través del desarrollo de



conectores metálicos específicos y elementos anti-volcamiento, que fuera sismo-resistente y contara con conexiones que fueran capaces de tomar holguras, siendo simples y desarmables. Todo esto para permitir el montaje de módulos de la manera más rápida y eficiente posible, en este sentido el edificio fue diseñado para ser prefabricado en menos de un mes y montado en menos de una semana (Figura 2).

La Torre Peñuelas tiene dimensiones en planta de 4.96x4.96m en cada piso, sin embargo las dimensiones de los módulos quedaron restringidas a las capacidades de transporte por carretera, debido a que los módulos no podían superar el ancho de 3.60 metros máximo transportable por camiones, esto condicionó que los módulos se dividieran en dos partes como se presenta en la Figura 2.

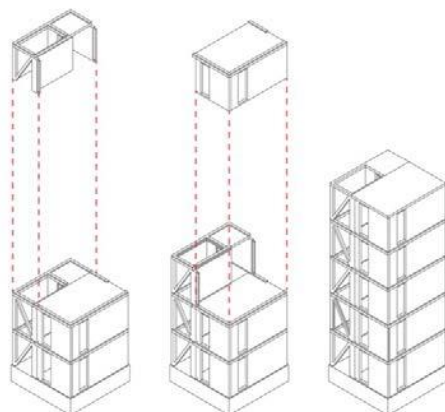


Figura 2: Proceso de ensamble de módulos en TP.

El proyecto Torre Peñuelas involucró tres etapas bien marcadas, la primera está relacionada con el diseño colaborativo y coordinado por todos los profesionales involucrados del área de arquitectura, ingeniería, especialidades, la industria y prefabricadoras, haciendo uso de la metodología BIM (Building Information Modeling), de esta forma se consigue un sistema común que conversa con todos los distintos actores.

La segunda etapa consistió en la prefabricación de los módulos en la industria, estos se construyeron en la planta de TecnoFast S.A., empresa líder en la construcción de edificios prefabricados de madera para la minería chilena. Sin embargo debido a que el proyecto tenía la innovación de las 4 caras, diferenciándose así a la construcción en línea de la compañía para el sistema de las 6 caras tradicionales con las que ellos operan, y considerando; que el volumen de la torre no era suficiente para justificar apartar una línea de producción industrial en su fabricación, ésta se realizó de forma *artesanal*.

Por último en la tercera etapa se realizó el transporte y montaje de los módulos en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, los cuales son los resultados en cuales se enfoca este documento.



3. METODOLOGÍA.

El método usado en este trabajo considera la obtención y captura de información por medio de un levantamiento de los procesos constructivos que fueron requeridos para la construcción de la Torre Experimental en Reserva Peñuelas. El desarrollo del proyecto, consto de dos etapas relevantes: Prefabricación off-site y Montaje on-site.

3.1. Prefabricación Off - site:

En la Etapa de prefabricación Off-site las mediciones se realizaron aplicando una metodología desarrollada por el Departamento de Ingeniería de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Corporación de Capacitación de la Construcción que corresponde a un sistema de control de la productividad (SCP) que consta de herramientas, entre ellas, del Muestro General de Trabajos (MGT) y de Encuestas de Detención de Capataces (EDC) (Santana, 1989).

3.1.1. Muestreo General de Trabajos (MGT):

Esta metodología considera la medición del estado de obra. El nivel de actividad es determinado a partir del tiempo de la jornada que se encuentra en las siguientes tres categorías:

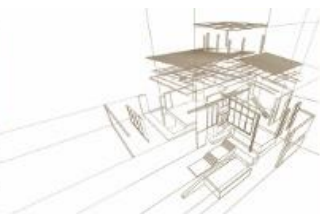
- I. Tiempo Productivo:** Corresponden a todas aquellas actividades que se realizan y que tienen directa relación con el objetivo o el resultado del proceso, estas se realizan en forma correcta y forman parte de una metodología de trabajo ordenada (ejemplo: todo aquel trabajo directo y medible).
- II. Tiempo Contributorio:** Corresponde a aquellas actividades que apoyan al resultado y por ende son necesarias, pero que a través de una correcta instrucción y planificación se pueden minimizar (ejemplos: consultar planos, explicar procedimientos, ayuda adicional en actividades complejas, etc.).
- III. Tiempo no Contributorio (o desperdicio):** Corresponden a todas aquellas actividades que no contribuyen al resultado, de existir una correcta planificación y generación de condiciones estas se pueden reducir para mejorar la productividad. (ejemplos: ir a buscar herramientas durante la secuencia, tiempos muertos por falta de planificación, descansos inesperados, etc.).

3.1.2. Encuesta de detención de capataces (EDC):

Corresponde a un cuestionario que se entrega a supervisores y capataces en donde deben explicar razones de las detenciones en el desarrollo de procesos constructivos.

3.2. Montaje On – Site:

La metodología aplicada durante la etapa de Montaje on-site contempló visitas a terreno, con el objetivo de obtener directamente mediciones, registros fotográficos y con



ello la elaboración de controles de avances periódicos y ajustes de la programación de obra según avances reales, notas de obra y consultas al contratista de construcción.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El levantamiento de información entregó como resultado que la torre fue construida en 81 días hábiles, tiempo asociado a las obras de movimientos de tierra, construcción de fundaciones, prefabricación de la torre y la etapa final asociada al montaje.

En total se consideraron 3330 h/h para la prefabricación de la torre y 2508 h/h para su montaje y terminaciones. La superficie total construida de la torre es de 119.1m², con esto dicho se procesaron 29.77m²/mes para la ejecución del proyecto.

Como se mencionó anteriormente la prefabricación de la TP se realizó de artesanalmente, lo cual condicionó unos tardíos tiempos en la fabricación de la torre, la construcción fue artesanal estándar, sin línea de construcción ni montaje, adicionalmente fue discontinua al no contar con una buena cadena de abastecimiento de los materiales, debido a que el origen de los materiales fue por medio de donaciones, todo esto arroja unos ratio negativos de productividad a nivel de industria, lo cual evidencia que hay un frente todavía abierto para seguir mejorando.

No obstante, si se dio el supuesto de poder llevar dos trabajos o faenas ejecutándose en paralelo, específicamente; se tiene que mientras se hacía la fabricación en planta de los módulos de 4 caras, en terreno se iban haciendo las faenas de localización, trazado, replanteo, excavaciones y construcción de fundaciones. Esto es importante porque a diferencia de una construcción tradicional donde las actividades son consecutivas y esto alarga los tiempos de obra; mediante este sistema de construcción prefabricada está la ventaja de poder hacer dos tareas en paralelo.

Con respecto a la medición de productividad, se hizo un levantamiento de información de los procesos más relevantes que se describen a continuación: Prefabricación Off - site y Montaje On-site.

4.1. Registro en etapa de Prefabricación Off – site.

A continuación, se presentan como ejemplo los resultados asociados a la construcción de los módulos correspondientes al Piso 4 y Piso 5 de Torre Peñuelas.

Piso 4:

- Cantidad de Operarios: 11
- Tiempo Total Invertido: 0:37:38 minutos
- Horas/Hombre Invertidas: 6,88 horas



Tabla 19: Distribución de tiempos de ensamble piso 4.

Operadores: 11			
Tipo de Tiempo	Duración	Distribución (%)	H/H Invertidas
Tiempo productivo	0:16:20	43%	2:59:40
Tiempo Contributorio	0:06:54	18%	1:15:54
Tiempo no contributorio	0:14:24	38%	2:38:24
Tiempo Total	0:37:38	100%	6:53:58

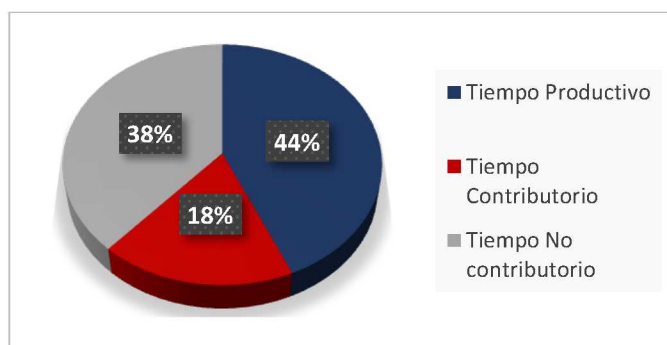


Figura 1: Distribución porcentual de tiempos Piso 4.

Piso 5:

- Cantidad de Operarios: 09
- Tiempo Total Invertido: 0:37:39 minutos
- Horas/Hombre Invertidas: 5,35 horas

Tabla 20: Distribución de tiempos de ensamble piso 5.

Operadores: 9			
Tipo de Tiempo	Duración	Distribución %	H/H Invertidas
Tiempo productivo	0:13:43	36%	2:03:27
Tiempo Contributorio	0:05:32	15%	0:49:48
Tiempo no contributorio	0:18:24	49%	2:45:36
Tiempo Total	0:37:39	100%	5:38:51

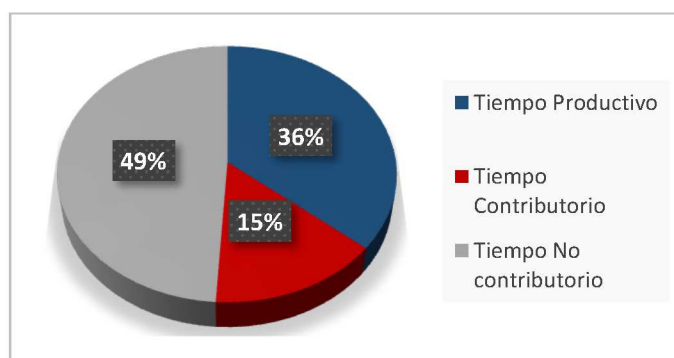


Figura 2: Distribución porcentual de tiempos Piso 5

Lo anterior evidencia que si bien existió un cierto incremento en el tiempo productivo cuando se adelantó la construcción del quinto piso respecto del cuarto debido a la reducción de H/H necesarias, todavía los tiempos no contributorios siguen siendo bastantes altos.

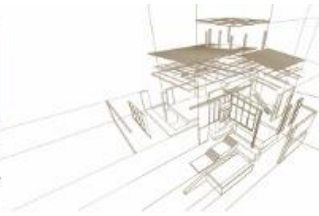
4.2. Registro en etapa de Montaje On – site.

Según la metodología expuesta en la sección 3, se realizó la medición de los tiempos de montaje de TP, para ello se conformaron equipos que se dedicaron a medir las actividades que se desarrollaban en las plataformas o mesas de trabajo, en las actividades de izaje de módulos, y en las actividades de terminación al interior de la estructura. A partir de estas mediciones se ha desarrollado una tabla con las actividades respectivas al proceso discriminando en cada entrada el tipo de trabajo que representa (productivo, contributorio o no contributorio) la cantidad de personal participante, la duración de la actividad y la necesidad de uso de grúa.

En base a los datos obtenidos se han alcanzado los siguientes resultados:

Tabla 3: Distribución de Trabajos en Horas por cada piso de Torre Peñuelas.

Piso	Trabajo Productivo	Trabajo Contributorio	Trabajo no Contributorio	Total General
1	6,71	3,78	0,52	11,01
2	4,13	2,75	1,28	8,17
3	3,57	2,98	1,32	7,87
4	4,92	1,97	0,65	7,53
5	4,60	0,92	0,35	5,87
Total hrs.	23,93	12,40	4,12	40,45



Se puede observar a través de la tabla anterior que la duración total de la actividad de montaje se vio reducida en cada piso de la torre, se tiene que para el quinto piso fueron requeridas 5.87hrs versus las 11.01hrs demandadas por el primer piso, lo cual evidencia una interesante curva de aprendizaje con un incremento en la productividad del 47% (Ver Figura 4). Al revisar los trabajos en cada categoría se observa que se van reduciendo en las tres categorías, pero que especialmente se reducen los trabajos contributorios. A continuación, se presenta una serie de gráficas para visualización de lo explicado anteriormente.

Se puede apreciar la reducción en el tiempo en las tres categorías, lo que implica un aprendizaje y optimización en los tiempos de las actividades por parte del recurso humano en la actividad. Es posible observar la reducción en los trabajos categorizados como contributorios, pues implica que en la medida que se optimizan y aprenden las actividades, es menos necesario realizar revisiones a la información de proyecto, además de contar con más precauciones previo a la actividad.

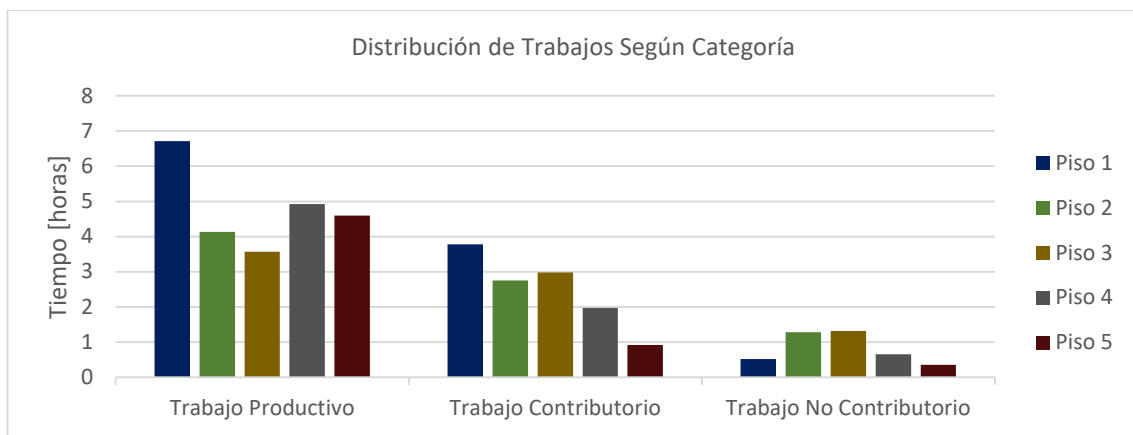


Figura 3: Distribución de Trabajos según categoría para montaje de 5 pisos de Torre Peñuelas.

Como resultado, la duración total de la actividad de montaje se ve reducida en cada caso, lo que se muestra en la gráfica siguiente:

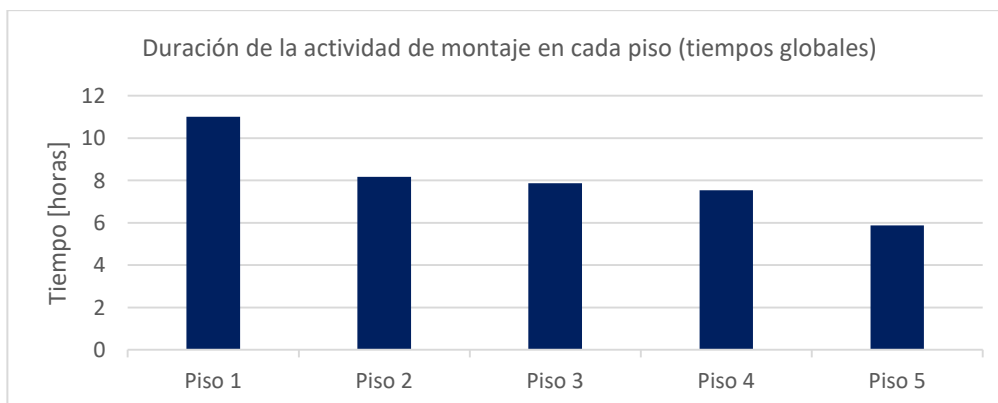
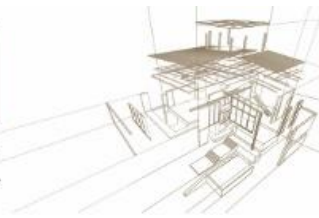


Figura 4: Duración de la actividad de montaje en cada piso (tiempos globales).



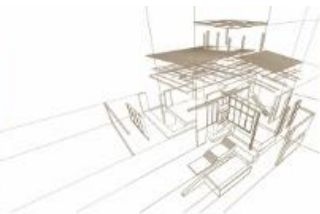
En comparación se puede apreciar un incremento en la productividad y una reducción de los tiempos asociados al montaje de módulos al mejorar la coordinación de actividades. No obstante, es importante destacar el rol de la planificación a nivel de detalle en el resultado de actividades de este tipo, pues a lo largo del proceso de montaje se apreciaron varios frentes para seguir mejorando en reducir la incidencia de errores y descoordinaciones que resultaban en una alta tasa de tiempos no contributivos a la construcción, es decir, los tiempos de mejoras en productividad anteriores tenían todavía un alto potencial de ser mejorados, por lo tanto llevando a cabo apropiadas actividades de gestión de la construcción de este sistema puede conducir a tiempos de montaje mucho menores.

Es importante reducir los tiempos que son no son productivos para aumentar la eficiencia del proceso de construcción, es por esto que la fase de estudio de proyectos de este tipo debe realizarse en forma minuciosa y considerando la secuencia de actividades completa, poniendo como principal hito la entrega y considerar hacia atrás cada una de las etapas del proceso.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de la Torre Peñuelas permitió obtener las siguientes lecciones:

1. Como punto de partida es necesario llevar a cabo el proyecto mediante la incorporación del diseño colaborativo entre arquitectura, ingeniería y especialidades con la participación de la industria, todos sobre la misma plataforma BIM, si esto se pasa por alto, las probabilidades de errores y faltas de correspondencia en las actividades futuras tienen altas probabilidades de ocurrencia. La experiencia de la construcción de esta torre sirvió como práctica y aprendizaje en el uso de la metodología y plataforma BIM relevando su importancia y necesidad de aplicación.
2. Se evidenció durante el desarrollo de este proyecto que el sistema de construcción en madera solo es eficiente de forma industrializada más no artesanalmente, al no ser posible por la envergadura del proyecto contar con una línea de construcción se tuvo una baja producción, sin embargo a pesar de que se tuvo un resultado negativo en planta, si se cumplió el supuesto de poder hacer trabajos en paralelo a diferencia del sistema secuencial en la construcción tradicional. Así se comprueba la simultaneidad, pero queda pendiente el análisis más fino en una línea de producción real.
3. Esta experiencia evidenció que la construcción industrializada en madera con este sistema de 4 caras y sus conexiones, pueden ser una buena respuesta en productividad para la industria de la construcción. Durante la etapa del montaje, se presentó una curva de aprendizaje con reducción de tiempos a la mitad entre el montaje del quinto piso respecto al primero, con potencial de inclusive mejorarse en la medida que se desarrollen más proyectos, e incidan así en adelantos de labores en la gestión de la construcción de estas estructuras.
4. Finalmente se refuerza el concepto que para una construcción industrializada es bastante importante realizar prototipos escala 1:1, esto posibilita el poder tener un mayor impacto en las curvas de aprendizaje para proyectos de envergadura.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar se agradece al Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) por su interés y esfuerzo en apoyar estudios interesados en el desarrollo de sistemas sustentables de construcción en Chile, se agradece a Tecnofast S.A. por su donación en la construcción y montaje de la Torre Peñuelas. De igual forma se agradece a todas las demás empresas e instituciones de la industria forestal y de la construcción que hicieron donaciones a para llevar a cabo este proyecto: Arauco, Corma, CMPC, JCE, LP, Lonza-Quimetal, Pizarreño, Ignisterra, Simpson Strong-Tie, Mamut, Casas Arbolito, Centra, Quilquinta, Cutek, Dynea, Duomo, Enko, Fleischmann, Fraunhofer, Glasstech, Home Center, ICC S.A., LEAF, Longi Solar, MIL Chemical Specialties S.A., Schneider, The Woods, TKO Consultores, Topwood.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fuentes, J., y G. García (2014), “Una mirada desagregada al deterioro de la productividad en Chile: ¿Existe un cambio estructural?”, *Economía Chilena*, vol. 17, núm. 1, pp. 4-36.

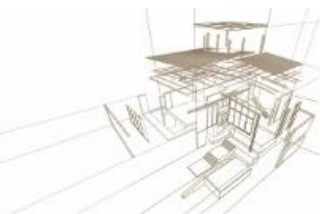
C. Álvarez, F. Rivera, H. Santa María, & M. Hube. A. Development of an exposure model of residential structures for Chile.

PrefabAUS, 2017. What is Prefab. <http://www.prefabaus.org.au/>.

Modular Building Institute. Why build modular. <http://www.modular.org>

McLening, C., Buck, L., 2012. Practice based learning approaches in collaborative design and engineering education: A case study investigating into the benefits of a crossdisciplinary practice based learning strategy. International Conference on Engineering and Product Design Education EPDE'12.

Excellence, C. (2004). Effective teamwork: A best practice guide for the construction industry. Constructing Excellence, Watford.



VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL CON PANELES CLT DE PINO URUGUAYO

FEASIBILITY OF THE CONSTRUCTION OF SOCIAL DWELLINGS USING CLT PANELS FROM URUGUAYAN PINE

Godoy, Daniel ⁽¹⁾ *; Baño, Vanesa ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dr. Arquitecto. Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República.
Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Dra. Ingeniera. Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República.
Montevideo, Uruguay / CESEFOR, Soria, España.

* Contacto: dgodoy@fing.edu.uy

Resumen

La vivienda de interés social presenta algunas características que la hacen particularmente apta para su prefabricación, como ser la realización de barrios completos, las tipologías repetitivas y, en ocasiones, la necesidad de una rápida construcción. El CLT como sistema constructivo requiere de un elevado volumen de madera, por lo que es deseable que la materia prima esté disponible localmente y sea económica. En Uruguay existe alta disponibilidad de madera de pino disponible para propuestas industriales, cuyas propiedades mecánicas son bajas (clase resistente $\leq C14$). El objetivo del trabajo es estudiar la viabilidad técnica y económica de realizar este tipo de viviendas con paneles CLT fabricados con pino de origen nacional y compararlo con la construcción con paneles de origen extranjero. Para ello se realizó un estudio de caso de viviendas de interés social construidas con paneles CLT fabricados con madera uruguaya clasificada visualmente según UNIT 1261 y con paneles comerciales de origen europeo de clase resistente C24. Para ambos casos se analizó el dimensionamiento estructural, la resistencia al fuego y la transmitancia térmica exigibles para esta clase de viviendas en Uruguay asociados al costo económico. Los resultados mostraron que el costo del metro cuadrado construido con paneles CLT de origen local resultó menor que con CLT importado y equivalente al de la construcción tradicional en Uruguay para viviendas de interés social.

Palabras-clave: madera contralaminada (CLT), vivienda de interés social,, bajas propiedades mecánicas

Abstract

Social housing has some characteristics that make it particularly suitable for prefabrication, such as the building of complete neighborhoods, repetitive typologies and, sometimes, the need for rapid construction. This building system requires a high volume of wood, so it is desirable that the raw material be economical and locally available. In Uruguay there is pine wood available for industrial proposals, whose mechanical properties are low (strength class $\leq C14$). The objective of the work is, therefore, to study the technical and economic feasibility of building social housing using cross-laminated timber panels (CLT) from Uruguayan pine and to compare its yield regarding the construction using commercial CLT panels imported from Europe. To achieve this objective, a case study of social dwellings built using CLT panels manufactured using Uruguayan pine visually graded according to UNIT 1261 and using commercial panels from Europe (strength class C24) was analyzed. For both cases, the structural design, fire resistance and thermal transmittance was studied, associated to the economic costs. Results showed that the cost per square meter built with Uruguayan CLT panels was lower than with imported commercial CLT panels, and equivalent to the traditional construction in Uruguay for social housing.

Keywords: Cross Laminated Timber (CLT), social housing, timber, low mechanical properties



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los paneles de madera contralaminada (CLT) son un producto apto para su venta y construcción a nivel global, existen experiencias de paneles fabricados en Austria y utilizados en edificios de 10 niveles construidos en Australia (Lend Lease 2013), en Estados Unidos de Norteamérica (Laguarda Mallo y Espinoza 2014), mientras que en Uruguay se han construido viviendas y un hotel con paneles importados de Italia (Enkel Group 2018). Este modelo puede ser discutible desde el punto de vista medioambiental y económico. En primer lugar, por la huella de carbono resultante de un traslado de este volumen de material por más de medio planeta y, en segundo lugar, por la disponibilidad de la materia prima de forma local.

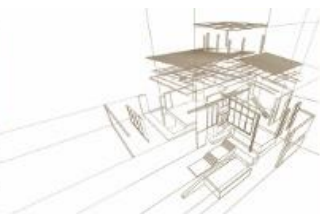
La materia prima local disponible presenta dos características principales; en primer lugar, por tratarse de plantaciones de rápido crecimiento, no alcanza las características mecánicas de las maderas europeas empleadas normalmente en la fabricación de paneles CLT (Moya et al. 2013). En segundo lugar, dadas las características del mercado local, gran parte de la madera cultivada de pino no tiene destino comercial (Dieste 2013). Es decir que sería posible encontrar madera disponible a bajo costo relativo, pero de bajas propiedades mecánicas (menores a las maderas europeas).

Varios autores han estudiado la viabilidad de fabricar paneles CLT utilizando recursos locales, que se tratan principalmente de especies de rápido crecimiento y de bajas propiedades mecánicas. Se ha estudiado el uso de pino radiata en Nueva Zelanda (Fortune y Quenneville 2011), de pino del sur en los Estados Unidos (Hindman y Bouldin 2015), de Sitka Spruce plantado en Irlanda (Sikora, McPolin y Harte 2016), de Sugi en Japón (Okabe et al. 2014), entre otros. La principal ventaja del sistema constructivo con paneles CLT está en la cantidad de madera que utiliza y no en su calidad (Steiger 2016). La norma de clasificación visual de pino Uruguayo UNIT 1261 (UNIT 2018), de reciente publicación, define dos calidades de madera denominadas EC1 y EC0, cuyas propiedades mecánicas se muestran en la tabla 1. Las propiedades físico-mecánicas de la madera clasificada visualmente como EC1 se ajustan a la clase resistente C14 de la norma europea EN 338 (AENOR 2016), mientras que a la calidad visual EC0 no es posible asignarle una clase resistente por dicha norma, por presentar valores inferiores a la menor clase reconocida. Para este trabajo la designaremos como una clase teórica “C11”.

Tabla 1 – Valores característicos de las calidades visuales EC1, EC0 (UNIT 1261)

Propiedad	EC1	EC0
Resistencia característica a flexión, $f_{m,k}$ (MPa)	15,5	11,0
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra, $E_{0,mean}$ (MPa)	7139	5327
5° percentil de la densidad, ρ_k (kg/m ³)	365	332

En un primer análisis del sistema constructivo que emplea paneles de madera contralaminada como forma de construir, puede suponerse que es un sistema costoso, debido al elevado volumen de madera que consume, y esto presenta una dificultad a la hora de alcanzar un precio competitivo (Calderon 2017). La posible aplicación de esta



tecnología para la vivienda de interés social en Sudamérica se ve comprometida debido a estos factores, pues este segmento del mercado está fuertemente determinado por el costo de construcción, ya que las instituciones estatales pretenden disponer de la mayor cantidad posible de unidades en el marco de presupuestos siempre acotados.

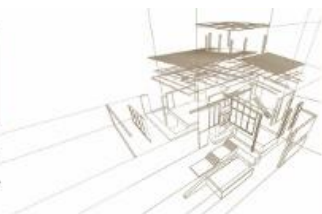
No obstante, para implantar el sistema constructivo en base a paneles de madera contralaminada son necesarias algunas condicionantes de partida, que parecen estar presentes en la actualidad en el Uruguay:

- i) Existencia de madera en forma abundante y a bajo costo, ya que los paneles están constituidos por altas cantidades de material.
- ii) Existencia de una brecha importante entre el costo de la mano de obra en sitio y el costo de la mano de obra en fábrica. En el caso del Uruguay, el fenómeno de la caída de rendimiento de la mano de obra en el sector de la construcción es notorio (Cagnoli 2015). De acuerdo con el Centro de Estudios Económicos de la Industria de la Construcción (Capurro, Oddone y Rego 2017), considerando el período 1996-2015, las obras recientes insumieron un 20% más de mano de obra que en el comienzo del período, tomando como indicador el pago de jornales por metro cuadrado construido, se pasó de 6,1 a 7,3 jornales en el período considerado, sumado a una mejora de la productividad esperable de más del 10% por la incorporación de nueva tecnología en el sector, que no se verificó en los hechos, permite concluir que existe un diferencial de productividad cercano al 30% en la mano de obra empleada para la construcción de viviendas.
- iii) Existencia en el mercado local de interés industrial en diversificar la matriz de productos en base a pino, de acuerdo al Plan de Acción Integral del Consejo Sectorial Forestal-Madera (CSFM 2013).

Por lo expuesto, el objetivo del presente trabajo es estudiar la viabilidad técnica y económica de realizar viviendas de interés social con paneles CLT fabricados con pino de origen nacional y compararlo con la construcción tradicional y con paneles de origen extranjero.

2. METODOLOGÍA

Se analizó el comportamiento estructural a flexión (para su uso en entresijos o cubiertas) y a flexo-compresión (para su uso en muros) de paneles CLT de 3 capas realizados con madera de calidades EC1 y EC0, para una sobrecarga de uso de vivienda (2 kN/m^2). A partir de los resultados obtenidos fueron dimensionados los cerramientos necesarios para resolver una vivienda de interés social de 2 dormitorios. Los cerramientos se diseñaron de modo tal, que el espesor del panel CLT por sí solo pudiera alcanzar la prestación requerida, es decir, cumpliera con la resistencia estructural, la resistencia en condición de incendio de 30 minutos y el coeficiente de transmitancia térmica exigido, no siendo necesaria la incorporación de otros materiales complementarios. Se consideró un diseño tipo de cerramiento conformado por un panel de CLT, una barrera impermeable, una cámara ventilada y un revestimiento exterior. Cabe mencionar, que esta opción no es la más rentable desde el punto de vista económico, pero se asumió para reducir la casuística.



Los requisitos técnicos a cumplir fueron obtenidos del documento Estándares de Desempeño y Requisitos para la Vivienda de Interés Social (MVOTMA 2011), en donde se establecen dos categorías de viviendas: i) Nivel 1, en donde la transmitancia térmica debe ser menor a $U=1,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en paredes y de $U=1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en techos, y ii) Nivel 2, en donde la transmitancia térmica debe ser menor a $U=0,85 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en todos los cerramientos.

Se realizaron estimaciones del costo de los paneles CLT para dos casos: i) paneles comerciales, se consideraron paneles de origen Europeo de clase resistente C24, en donde se tomó el precio de mercado promedio y se incluyó los costes resultantes del proceso de importación al mercado local (transporte, seguros, tasas aduaneras e impuestos), y ii) paneles de fabricación local, dado que no existe productores locales los costos fueron obtenidos de (Dieste et al. 2018), asumiendo una diferencia entre el costo de la madera de clase EC1 y EC0 del 20%.

3. RESULTADOS

En la Figura 1 se muestra la relación entre el espesor total del panel y la luz libre que salvan los paneles de 3 capas trabajando a flexión, para las clases resistentes “C11”, C14 y C24. Se dimensionaron para dos condiciones: sin exigencias de resistencia a fuego (R0) y para un tiempo de resistencia de 30 minutos (R30), la cual es la exigida en viviendas de altura menor a 7 metros. En la misma se muestra el máximo espesor de panel posible determinado por la norma EN 16.351 (AENOR 2015), la cual limita el espesor máximo de lámina. Como puede apreciarse, la condición R30 no resulta la determinante en la elección del espesor del panel, siendo la combinación la condición R0 y aislación térmica deseada los parámetros determinantes. Las luces máximas en flexión para paneles “C11” y C14, limitadas por el espesor máximo de lámina, son razonables para su uso en entrepisos y cubiertas de programas de vivienda.

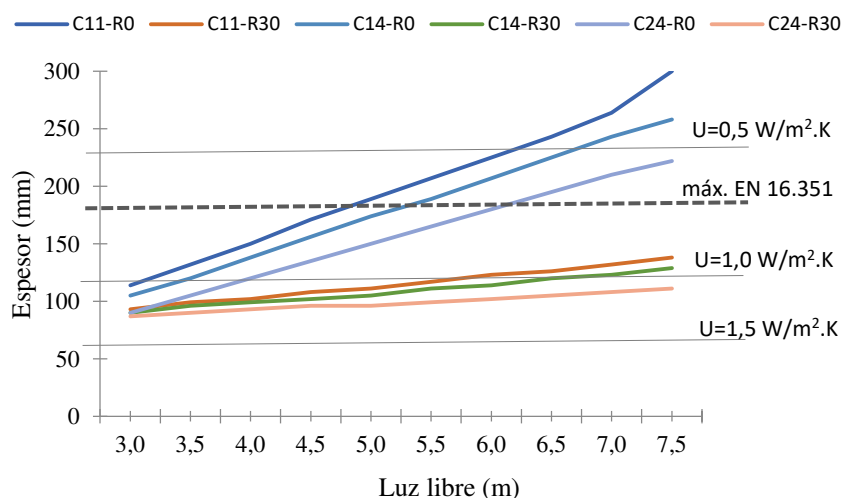


Figura 1: Relación entre espesor, luz libre en flexión y transmitancia térmica



La figura 2 muestra la relación entre espesor, luz libre en flexocompresión (para su uso en muros) y transmitancia térmica. Para las luces analizadas los espesores resultantes están todos por debajo del tamaño máximo limitado por la norma EN 16.351 (AENOR 2015) de 180 mm para paneles de 3 capas. La condición de incendio R30 es el determinante del espesor del cerramiento por sobre la condición sin situación de incendio. Como puede apreciarse, para alturas de muros habituales en el caso analizado, en el entorno de los 3 metros de luz, es necesario dimensionar el muro por su transmitancia térmica para viviendas de Nivel 1 y 2, ya que el valor obtenido por los requerimientos estructurales está por debajo del nivel de confort térmico requerido.

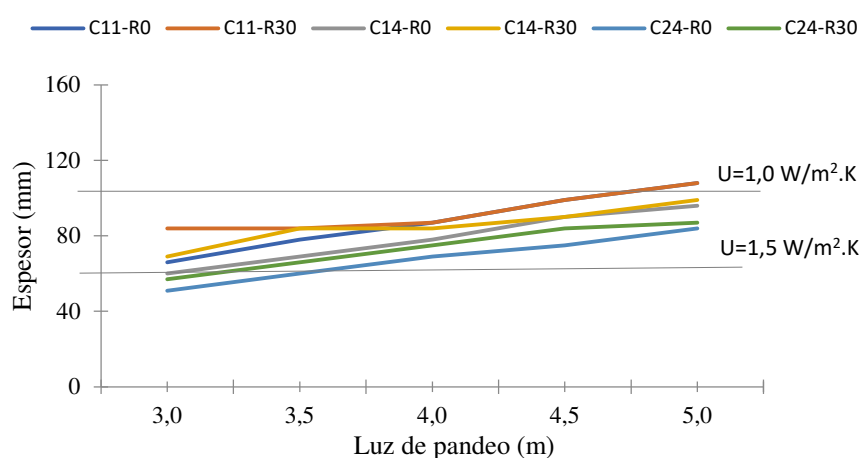


Figura 2: Relación entre espesor, luz libre en flexocompresión y transmitancia térmica

De acuerdo al dimensionamiento obtenido de los cerramientos se procedió a calcular el costo de construcción de una vivienda de interés social tipo de 2 dormitorios, para los Niveles 1 y 2, y para paneles CLT de clase resistente “C11”, C14 y C24. La tabla 2 muestra los costos por metro cuadrado construido para las distintas combinaciones.

Tabla 2: Valor del m² construidos con paneles CLT

CLT	C11	C14	C24
	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²
Nivel 1	1.295	1.339	1.446
Nivel 2	1.388	1.476	1.695

A modo comparativo en la tabla 3 se muestran los precios máximos de tasación por metro cuadrado construido para vivienda de interés social en Uruguay en formato de cooperativa de vivienda, para construcción tradicional y para sistemas constructivos considerados no tradicionales, y que cuentan la aprobación por parte del estado (MVOTMA 2019).



Tabla 3: Valores máximos de tasación para viviendas de interés social.

Sistema constructivo	1	2	3	4	5
	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²	U\$\$/m ²
2 dormitorios (55 m ²)	1.338	1.147	1.010	1.010	896

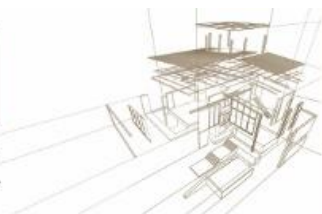
1. Construcción tradicional / 2. steel framing + placa cementicia + mortero proyectado / 3. paneles de poliestireno expandido revestidos en chapa / 4. paneles prefabricados de hormigón + aislaciones / 5. paneles SIP

4. CONCLUSIONES

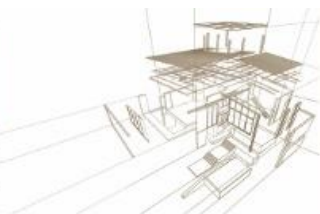
- De acuerdo a los valores obtenidos, resultaría mas rentable desde el punto de vista económico construir viviendas de interés social con paneles de fabricación local, realizados a partir de madera clasificada visualmente como EC1 y EC0, que con paneles comerciales importados de Europa, pese a sus menores propiedades mecánicas.
- Construir vivienda de interés social con paneles con maderas locales resultaría competitivo con la construcción tradicional in situ, realizada con hormigón armado y mampostería colocada por vía húmeda.
- Las viviendas realizadas con paneles locales serían más caras que otros sistemas prefabricados existentes en el mercado para la vivienda de interés social. No obstante, la mayoría de los sistemas alternativos son realizados con productos importados, frente a lo cual se podría considerar discutir su conveniencia, desde el punto de vista del desarrollo local, de su huella ecológica, entre otros aspectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AENOR, EN 16351. *Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos*. 2015. S.I.: s.n. 2015.
- AENOR, EN 338. *Madera estructural. Clases resistentes*. 2016. S.I.: s.n. 2016.
- CAGNOLI, Ariel, Según constructores es imposible bajar precio de las viviendas *Presidente de la Asociación de Promotores Privados de la Construcción del Uruguay. Entrevista Diario El país, 10 de marzo de 2015.*, 2015.
- CALDERON, Jorge, *Comunicacion personal*. 2017. Concepcion, Chile: Gerente de CRULAMM. 2017.
- CAPURRO, Alfonso, ODDONE, Gabriel y REGO, Santiago, *La productividad en la industria de la construcción*. S.I.: 2017.
- CSFM, Puesta a punto [en línea]. Rivera, Uruguay: Disponible en: <http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/csfm-avances-18-03-2014-rivera.pdf>. 2013.
- DIESTE, Andrés, *Programa de promoción de exportaciones de productos de madera*. Montevideo: 2013.
- DIESTE, Andrés, CASSELLA, Francisco, MOLTINI, Gonzalo, PALOMBO, Viviana, CLAVIJO, Leonardo, CABRERA, María Noel y BAÑO GÓMEZ, Vanesa, *Forest-based bioeconomy areas Strategic products from a technological point of view*. S.I.: 2018.
- ENKEL GROUP, *Hotel La Juanita*. 2018. S.I.: Comunicacion personal. 2018.



- FORTUNE, P. y QUENNEVILLE, A.L., A feasibility study of New Zealand Radiata Pine crosslam21st *Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. Melbourne, VIC: s.n., pp. 885-889. 2011.
- HINDMAN, Daniel P. y BOULDIN, John C., Mechanical Properties of Southern Pine Cross-Laminated Timber *Journal of Materials in Civil Engineering* [en línea], vol. 27, no. 9, pp. 04014251. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001203. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001203>. 2015.
- LAGUARDA MALLO, Maria Fernanda y ESPINOZA, Omar, Outlook for Cross-Laminated Timber in the United States, vol. 9, no. Evans 2013, pp. 7427-7443. 2014.
- LEND LEASE, Forté building web page [en línea]. [Consulta: 5 enero 2016]. Disponible en: www.forteliving.com.au. 2013.
- MOYA, Laura, LAGUARDA, María F., CAGNO, Matías, CARDOSO, Andrea, GATTO, Francisco y O'NEILL, Hugo, Physical and Mechanical Properties of Loblolly and Slash Pine Wood from Uruguayan Plantations *Forest Products Journal* [en línea], vol. 63, no. 3-4, pp. 128-137. ISSN 0015-7473. DOI 10.13073/FPJ-D-13-00024. Disponible en: <http://forestprodjournals.org/doi/abs/10.13073/FPJ-D-13-00024>. 2013.
- MVOTMA, *Estándares de Desempeño y Requisitos para la Vivienda de Interés Social*. 2011. S.l.: Ministerio de Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. 2011.
- MVOTMA, *Resolucion ministerial 377/2019*. 2019. Uruguay: Ministerio de Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. 2019.
- OKABE, Minoru, YASUMURA, Motoi, KOBAYASHI, Kenji y FUJITA, Kazuhiko, Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber *Journal of Wood Science*, vol. 60, no. 1, pp. 49-58. ISSN 14350211. DOI 10.1007/s10086-013-1377-8. 2014.
- SIKORA, Karol S., MCPOLIN, Daniel O. y HARTE, Annette M., Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 116, pp. 141-150. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>. 2016.
- STEIGER, R., *Comunicacion personal*. 2016. S.l.: s.n. 2016.
- UNIT, *UNIT 1261. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural – Madera de pino taeda y pino ellioti (Pinus taeda y Pinus elliotii)*. 2018. S.l.: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. 2018.



MiniMOD: DESENVOLVIMENTO DE PROJETO EM *CROSS LAMINATED TIMBER* NO BRASIL

MiniMOD: *CROSS LAMINATED TIMBER* PROJECT'S DEVELOPMENT IN BRAZIL

Gratone, Julia R. ⁽¹⁾*; Leite, Thaisa M. ⁽²⁾; Sánchez, José Manoel M. ⁽³⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

⁽²⁾ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

⁽³⁾ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

* Contato: juliagratoe@gmail.com

Resumo

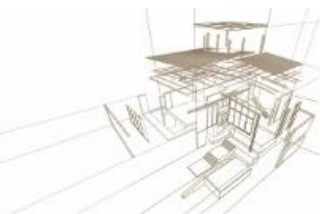
Introduzido no Brasil desde 2012, o *cross laminated timber* (CLT) é um produto inovador em ascensão no mundo. Sua visibilidade tem ocorrido devido ao seu alto grau de industrialização e racionalização da construção, rapidez de montagem, obras limpas e por sua capacidade de sequestrar carbono da atmosfera. Uma das experiências notórias em CLT no Brasil foi o projeto MiniMOD – módulos estruturais em CLT que aliam conceitos de sustentabilidade e tecnologia construtiva, materializada pelo escritório binacional MAPA. O objetivo do presente artigo é investigar os projetos MiniMOD, analisando as edificações instaladas no estado de São Paulo e observando os seguintes aspectos: *a) concepção e desenvolvimento de projeto; b) mapeamento do processo de produção dos painéis e dos módulos em fábrica; e c) montagem dos módulos.* O método de pesquisa adotado se baseou na revisão literária e documental (catálogos de fabricantes, normas técnicas, registros técnico e fotográfico da obra, desenhos arquitetônicos) e em entrevistas com os atores atuantes no desenvolvimento do projeto. Como resultado, apresentam-se não só um mapeamento do processo produtivo dos módulos em CLT (projeto e produção), mas também, a identificação de quais variáveis viabilizariam a expansão do uso dos painéis CLT e da proposta MiniMOD na construção civil brasileira.

Palavras-chave: Construção em madeira, Cross Laminated Timber, MiniMOD

Abstract

Introduced in Brazil since 2012, the *cross laminated timber* (CLT) is an innovative product on the rise around the world. Its visibility has been set by its high degree of industrialization and rationalization of the construction, fast assembly, a clean construction site and its capacity to sequester the air's carbon. One of the notorious CLT experiences in Brazil was the MiniMOD project – CLT structural modules that combine concepts of sustainability and constructive technology, designed by the binational office MAPA. The objective of this paper is to investigate the MiniMOD projects, analyzing the constructions located in São Paulo and observing the following aspects: *a) design and project development; b) mapping of the panels and modules production process in the factory; and c) the modules assembly.* The research method embraced was based on literature and documental review (manufactures' catalogues, technical standards, technical and photographic construction records and architectural drawings) and interviews with the actors involved in the project development. As a result, not only a production process mapping of the modules in CLT (project and production) is shown, but also the identification of which variables facilitated the expansion of the CLT panels and the MiniMOD proposal in the Brazilian construction.

Keywords: Timber construction, Cross Laminated Timber, MiniMOD.



1. INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial, o mundo modificou-se de forma a abrigar inovações nunca imaginadas em um cenário anterior. Ateliês tornaram-se fábricas, as mãos tornaram-se máquinas, dias tornaram-se horas e um produto único tornou-se múltiplo. Na construção civil, a industrialização significou uma mudança de paradigma, racionalizar tornou-se o cenário moderno (Leite, Moraes and Sánchez 2018a). A ideia então proposta é aprimorar o desempenho da atividade construtiva por meio de um processo que aperfeiçoa os recursos para a construção em etapas bem definidas. Conforme a definição de Gibb apud Fabrício (2013):

“A industrialização na construção civil é uma mudança de pensamento e prática para melhorar a produção de construção para produzir uma alta qualidade, personalizar o ambiente construído, através de um processo integrado, otimizando a padronização, organização, custo e valor, a mecanização e automação”.

Esse cenário fundamenta uma ampla discussão a respeito de questões de sustentabilidade e eficiência, abrindo espaço para a temática da madeira na construção. Além da redução do peso, facilitando o seu transporte, há também a questão ambiental. A indústria da construção civil é responsável, no momento atual, por 65 a 75% do consumo de recursos naturais, 50 a 65% de geração de resíduos sólidos e 42% do consumo energético do mundo (Moraes 2018). Portanto, a ênfase na proposição da madeira como material do futuro se faz completamente admissível. A madeira gera a diminuição do consumo energético com o sequestro de carbono além de um número muito inferior de resíduos sólidos.

Somando-se a isso, os avanços tecnológicos permitem um uso maior e mais elaborado da madeira. Os painéis *cross laminated timber* (CLT) fazem parte desses novos produtos tecnológicos. Pré-fabricados, podem constituir as lajes de piso e teto e paredes com ou sem função estrutural. Como o nome explica, são compostos por lamelas – 20, 40 ou 60 mm de espessura – coladas perpendiculares entre si, por adesivos estruturais, sempre em números ímpares e variam de três a nove camadas (Leite, Sánchez and Blumenschein 2018).

A produção brasileira de obras arquitetônicas com uso dos painéis CLT no Brasil teve seu início em 2012 com uma residência unifamiliar em Tiradentes (MG). Entre 2012 e 2019, construíram-se 38 obras utilizando os painéis *cross laminated timber* – integralmente ou parcialmente – no território brasileiro, seja para fins residenciais ou comerciais, de 01 a 02 pavimentos (Oliveira 2018).

Dentre os 38 projetos construídos com os painéis CLT, o projeto MiniMOD apresentou uma grande repercussão no Brasil e no mundo com a sua proposta de módulos tridimensionais, totalmente produzidos em fábrica. O uso da madeira e, especificamente, dos painéis *cross laminated timber* no MiniMOD mostrou a eficiência desse produto quanto à racionalização, à rapidez de montagem e à integração projetual.



2. OBJETIVOS

Diante o exposto, o objetivo do artigo é investigar a produção brasileira dos painéis *cross laminated timber* utilizando-se o projeto MiniMOD como referência projetual. Os aspectos analisados são: *a) concepção e desenvolvimento de projeto; b) mapeamento do processo de produção dos painéis e dos módulos em fábrica; e c) montagem dos módulos.* A análise levará em consideração as edificações construídas em 2015, no estado de São Paulo, na região da Fazenda Catuçaba, em São Luiz do Paraitinga (SP).

3. MÉTODO DE PESQUISA

O artigo fundamentou-se na revisão bibliográfica e documental por meio da análise de artigos, dissertações e teses, normas técnicas, catálogo e plataformas oferecidas pelos fabricantes e arquitetos envolvidos com o tema. Efetuou-se a análise da literatura referente aos painéis *cross laminated timber*, no Brasil e no mundo bem como o estudo de caso, o projeto MiniMOD.

Adotou-se como estratégia de pesquisa o estudo de caso para melhor compreensão da produção e resultado de um projeto em CLT no Brasil. E como objeto de estudo, optou-se pelo MiniMOD – do escritório binacional MAPA – que apresenta uma vertente da construção em CLT – a de módulos tridimensionais – e que teve uma resposta positiva no Brasil e no mundo, tanto por meio de prêmios arquitetônicos quanto pela avaliação dos clientes.

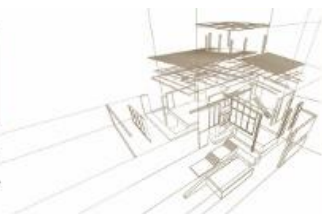
Como auxílio para análise dos dados, realizou-se uma entrevista estruturada com o escritório MAPA, no dia 5 de abril de 2019, em Porto Alegre (RS). Além disso, considerou também os dados coletados durante a entrevista realizada pela pesquisadora Daitx (2017) para sua dissertação de mestrado.

4. MiniMOD: PROJETO, PRODUÇÃO E MONTAGEM

4.1. Projeto MiniMOD

4.1.1. O escritório MAPA

O escritório de arquitetura brasileiro-uruguaio MAPA formou-se a partir da junção de dois escritórios já existentes: o Studio Paralelo – em Porto Alegre, no Brasil – e o MAM – no Uruguai, em 2008. Um dos marcos do escritório, quanto à produção arquitetônica em si, é o desenvolvimento de habitações em terrenos isolados de centros urbanos. O interesse pela pré-fabricação surgiu em decorrência da particularidade dos terrenos – isolados e de difícil acesso, com limitações de transporte para a construção da obra. Dessa forma, o escritório passou a se questionar sobre a viabilidade de uma arquitetura que pudesse ser transportada pronta para o local de implantação. Com isso, surgiram os estudos do projeto MiniMOD. O projeto manifestou-se como um protótipo de uma arquitetura pré-fabricada que pudesse atender a demanda de diversos clientes, sempre integralmente realizada em fábrica e transportada como um *container* para o local de implantação.



4.1.2. MiniMOD Catuçaba

O “sistema MiniMOD” é constituído de módulos compactos e combináveis, possibilitando diversas configurações para a concepção de diferentes projetos, de acordo com as necessidades do cliente e com a sua inserção na paisagem (Casas de Catuçaba 2018). O primeiro MiniMOD, financiado pelo escritório, foi construído em *steel frame* no ano de 2013. Seu resultado positivo fez com que o fabricante de painéis CLT no Brasil, localizado em São Paulo, entrasse em contato com o escritório com a proposta de utilizá-los para o projeto MiniMOD. O escritório interessou-se pela simplicidade, estética, e pelo aspecto natural que a madeira proporciona (Daitx 2017). Assim sendo, o projeto foi alterado para adequar-se ao material da melhor forma possível, evitando desperdícios e incorporando a lógica de produção industrializada no projeto.

Os módulos em CLT são compostos por painéis com dimensões de 2,9x2,9x2,9 metros com o objetivo de otimizar os custos e diminuir o desperdício. Os painéis nas proporções estabelecidas e com uma espessura de 08 centímetros compõem piso, teto e paredes. Para as paredes dos módulos, propôs-se um sistema de fachada ventilada, que além do painel CLT aparente internamente, apresenta revestimento externo composto por ripas verticais, que passaram por uma técnica japonesa de queimadura da face, chamada de *shou sugi ban*, para garantir durabilidade das peças expostas.

A área livre do módulo em planta é de 2,9x2,9m, porém, em relação às paredes houve o deslocamento da peça do teto para formar um espaço de 20cm, aproximadamente, na cobertura – como uma platibanda – para instalação do sistema de impermeabilização e claraboias. O mesmo ocorreu com o piso para a passagem de instalações (Daitx 2017). Com esses deslocamentos, o pé-direito do módulo finalizou em 2,50m.

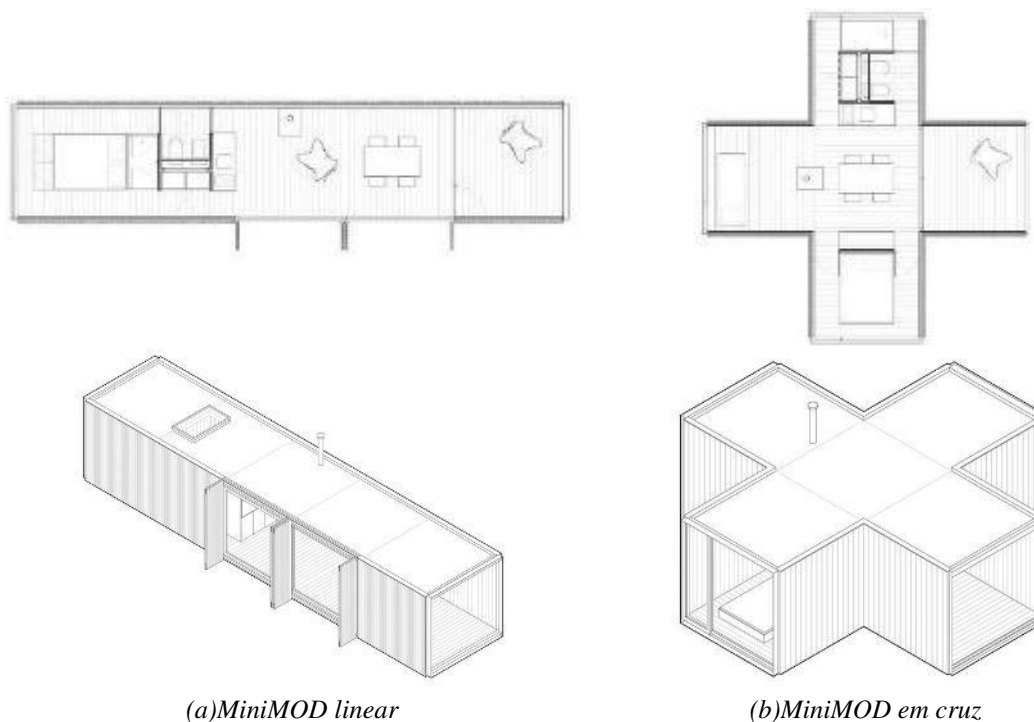


Figura 1: O projeto MiniMOD Catuçaba (SP). (a) Projeto linear e (b) projeto em cruz, ambos com 05



módulos. Fonte: Acervo MAPA (2018)

A proposta do sistema MiniMOD permite inúmeras configurações em planta e a combinação dos módulos fez com que surgissem dois projetos iniciais para a Fazenda Catuçaba (SP), a planta linear e a planta em cruz, combinado 05 módulos com as seguintes funções: dormitório com cama; dormitório com beliche; banheiro e cozinha; multiuso com lareira; multiuso conector; e terraço com acesso, como é possível perceber na Figura 1.

4.2. Produção dos módulos em fábrica

A produção dos módulos tridimensionais MiniMOD em fábrica segue as seguintes etapas: *a) produção dos painéis cross laminated timber (CLT) de 03 camadas; b) conexão dos painéis formando módulos; c) instalação dos componentes de vedação (esquadrias e revestimentos externos); d) instalações elétricas, hidráulicas e sistema de aquecimento; e) acabamentos (cozinha, banheiro, mobiliário).* Os painéis CLT utilizados no projeto são os de 03 camadas, com lamelas de 20 e 40mm de espessura, com espessura final de 8cm. A espécie utilizada é o *pinus taeda*, proveniente de florestas plantadas dos estados do Paraná e Santa Catarina.

Conforme as Figuras 2 e 3, as etapas que compõem a produção dos painéis são: *recepção dos lotes de madeira; classificação visual das peças com eliminação de defeitos; execução das emendas finger joint; aparelhamento das peças (desempeno e desengrosso); montagem, colagem e prensagem das peças de madeira na prensa à vácuo; usinagem final na máquina controlada numericamente por computador (CNC) de 05 eixos; acabamento final dos painéis; codificação e separação dos painéis para a próxima fase, montagem dos módulos.*

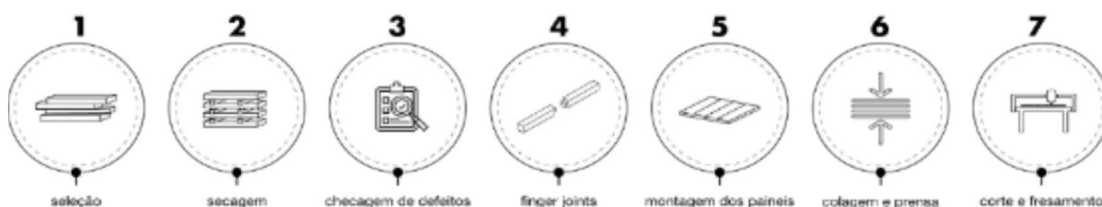


Figura 2: Diagrama do processo de produção dos painéis CLT no Brasil.

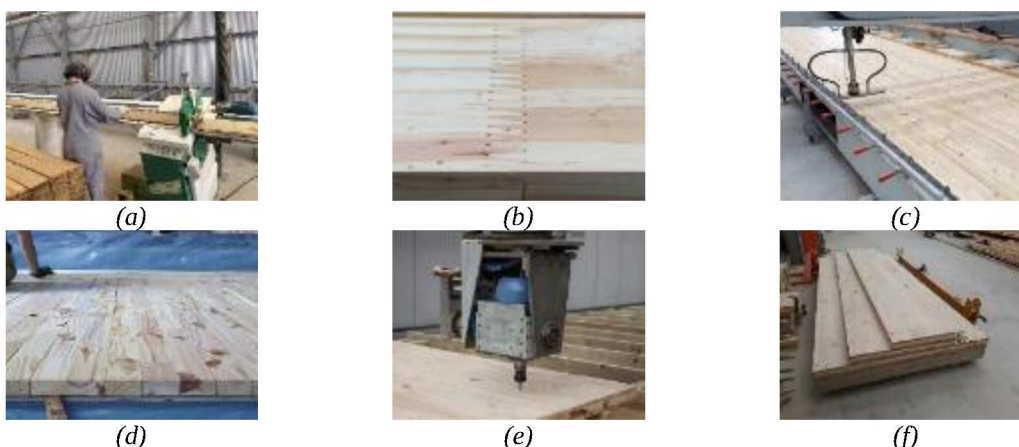


Figura 3: (a) eliminação dos defeitos; (b) execução da emenda finger joint; (c) aplicação do adesivo na



câmara da prensa à vácuo; (d) posicionamento das lamelas de pinus formando camadas perpendiculares entre si; (e) Máquina CNC e usinagem final; e (f) painéis lixados prontos para montagem. Fonte: Oliveira (2018) e Crossiam (2019b).

A montagem dos painéis, transformando-os em módulos tridimensionais, é todo realizado em fábrica (Suzano/SP), considerando todos os aspectos do projeto, com instalação das esquadrias, o revestimento externo composto por um ripado de madeira e o mobiliário (armários, cama e beliche), também executado com painéis CLT.

Essa etapa é simples, não há necessidade de uso de ferramentas ou equipamentos complexos. A junção dos painéis formando os módulos é realizada por meio de aparafusamento de cantoneiras metálicas. Ao finalizar a montagem dos módulos, eles são unidos de acordo com o projeto para avaliação de possíveis defeitos e então separados novamente. São codificados, embalados e armazenados para futuramente serem enviados para o local de implantação.

O tempo de execução dos painéis e montagem dos módulos em fábrica é de aproximadamente 02 semanas. Em virtude da rapidez de fabricação dos MiniMODs, seria possível ter um cronograma de 01 mês para montagem e instalação no local. Mas, em razão de imprevistos como atrasos na entrega de componentes (esquadrias), dificuldades na execução das fundações no local, imprevistos no transporte dos módulos, o prazo previsto desde o desenvolvimento do projeto até a entrega final é de 03 meses. Mesmo prevendo imprevistos, percebe-se que o desenvolvimento de um projeto de 42m² todo em fábrica é extremamente rápido.

Na Figura 4 a seguir, apresentam-se as etapas de montagem dos módulos dos MiniMODs – linear e em cruz - na fábrica, em São Paulo.

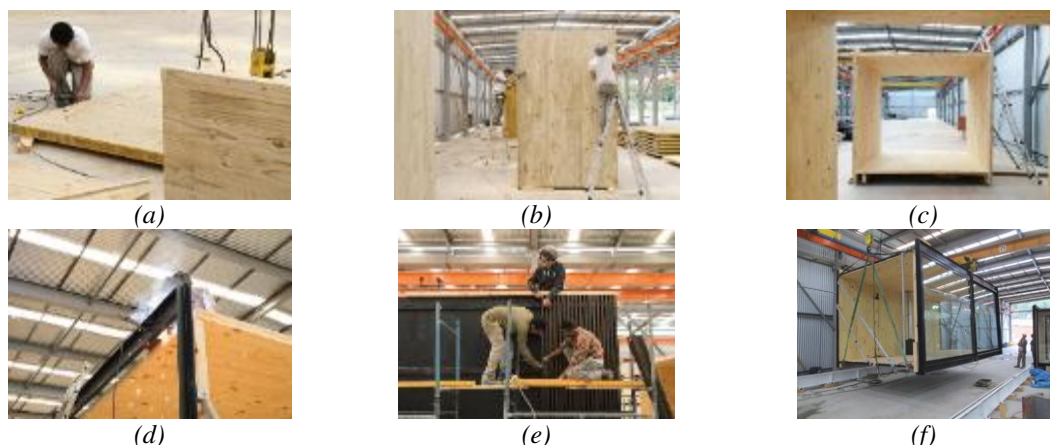


Figura 4: Montagem dos módulos em fábrica. (a) (b) montagem dos painéis; (c) módulos 2,9x2,9x2,9m pré-montados; (d) instalação das esquadrias; (e) instalação do revestimento externo; (f) módulos prontos. Fonte; acervo MAPA (2016) e Crossiam (2019)

4.3. Produção e montagem na Fazenda Catuçaba (SP)

Um dos motivos pela escolha de uma modulação de 2,9x2,9x2,9m se deu pela facilidade do transporte, principalmente em um terreno de difícil acesso. No Brasil, de acordo Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte (DNIT 2016), cargas com até 3,2 metros de largura, 30 metros de comprimento e 4,4 metros de altura não precisam de



escolta e podem circular em rodovias durante a noite e o amanhecer mediante Autorização Especial de Transito (AET).

A distância entre a fábrica em Suzano (SP) e o local de implantação dos módulos, na Fazenda Catuçaba, em São Luiz do Paraitinga (SP) é de 150km. Apesar da proximidade do local de produção, a decisão projetual de se optar por módulos menores foi acertada para minimizar os custos com o transporte – veículo para o transporte de carga, quantidade menor de viagens, a não necessidade de se ter um batedor.

A montagem dos módulos no local de implantação foi realizada por uma equipe contratada, distinta da equipe de produção em fábrica. A fundação composta por pontalotes, a priori foi executada se baseando nos eixos dos módulos e, na sequência, os módulos do MiniMOD foram fixados por meio de um conector metálico que faz apenas o ajuste de altura para o encaixe dos módulos no local, como é possível observar na Figura 5.

Como citado anteriormente, o tempo total de desenvolvimento do projeto, produção em fábrica e montagem no local é de 03 meses, aproximadamente.

No ano de 2015, instalaram-se dois tipos de MiniMODs na Fazenda Catuçaba, em São Luiz do Paraitinga (SP). Na Fazenda, há 07 lotes previstos para instalação dos MiniMODs no total. Como dois modelos já foram instalados, ainda há disponibilidade para a inserção de mais 05.

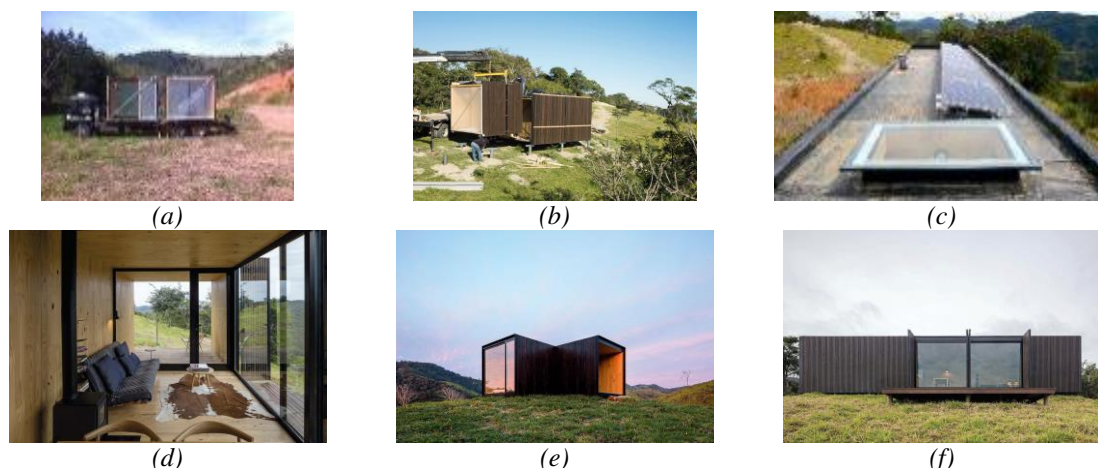


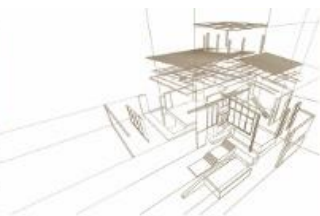
Figura 5: Instalação dos MiniMODs . (a) transporte dos módulos; (b) fixação dos módulos na fundação; (c) impermeabilização e instalação de placas solares; (d) vista interna do MiniMOD linear; (e) vista externa do MiniMOD em cruz; (f) vista externa do MiniMOD linear.

Fonte: acervo Mapa (2016).

5. CONCEPÇÕES E DESAFIOS

5.1. Projeto

Por ser um produto que é utilizado no Brasil há apenas sete anos, ainda existem gargalos a serem superados no uso dos painéis *cross laminated timber*. O MiniMOD presenciou



alguns empecilhos e adotou certas medidas para viabilizar a construção de seus módulos.

A primeira etapa a ser cumprida pelo escritório quanto ao projeto arquitetônico é entender o processo produtivo do material nas fábricas atuantes no Brasil. No momento de desenvolvimento do projeto MiniMOD, havia apenas uma fábrica produtora de painéis CLT, localizada em Suzano (SP), a 1200km da sede do escritório de arquitetura.

Como citado inicialmente, a boa repercussão do primeiro protótipo executado em *steel frame* fez com que a fábrica entrasse em contato com o escritório apresentando as possibilidades de se utilizar os painéis *cross laminated timber* para a produção dos módulos. Desafio aceito, fábrica e escritório firmaram parceria e com isso seria necessário compreender o processo produtivo e a infraestrutura da fábrica – dimensões dos painéis, maquinários utilizados - adequando o projeto ao contexto encontrado em fábrica. Outro aspecto que condicionou o dimensionamento dos módulos foi o sistema de transporte de cargas nas rodovias brasileiras e suas limitações.

A limitação na aprovação de projeto também é uma questão levantada pelo escritório tanto durante a entrevista realizada em abril de 2019 quanto na dissertação de Daitx (2017). Atualmente, o MiniMOD foi instalado apenas em terrenos em áreas rurais que não requerem aprovação tão minuciosa como em áreas urbanas. A aprovação de projetos em áreas urbanas de um sistema construtivo inovador ainda apresenta dificuldades, principalmente quando se trata de uso da madeira na construção civil e suas limitações nas normas de segurança e combate ao incêndio (Daitx 2017).

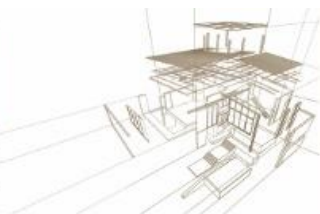
O sócio do escritório MAPA, menciona em sua entrevista, que caso houvesse a necessidade de aprovar o MiniMOD em um terreno urbano, no presente momento, provavelmente teria que ser aprovado como uma construção temporária; ele menciona um projeto nos Estados Unidos que implementou rodas aos módulos para que se tornasse possível a aprovação (Daitx 2017).

Essa conceituação de sistema inovador também cria uma complexidade na aprovação para o financiamento para a compra de um MiniMOD. Isso torna-se um impedimento para muitas pessoas pelo seu custo elevado de seis mil reais o metro quadrado (Daitx 2017).

Apesar das dificuldades em função das normas vigentes, há um esforço entre pesquisadores brasileiros e fabricante de obter laudos sobre o desempenho dos painéis CLT quanto às suas propriedades físico-mecânicas, resistência ao incêndio, estanqueidade, entre outros ensaios (Oliveira 2018).

Outra questão é a mudança no processo de projeto. Ao desenvolver propostas industrializadas, o projeto precisa ter uma maior integração entre as disciplinas – arquitetura, estrutura e instalações. Percebe-se, também, uma necessidade de maior compreensão do processo de produção. Como forma de auxílio para o desenvolvimento do projeto, o uso de ferramentas ou *softwares* com uma plataforma mais integradora (*Building Information Modeling*) é uma questão no Brasil.

O MiniMOD hoje é desenvolvido em *software* que usa essa plataforma (software Revit) acelerando o processo e correspondendo ao sistema industrializado e racionalizado que funciona melhor com a plataforma BIM e as plataformas utilizadas



nas fábricas (softwares das máquinas CNC). Contudo, nem todas as empresas utilizam esse software, o que faz com que o escritório tenha que ter um arquivo na plataforma CAD.

5.2. Produção, montagem e outros aspectos

Outro desafio para a produção dos módulos do MiniMOD diz respeito ao despreparo quanto aos produtos e sistemas industrializados que requerem alta precisão na sua concepção. Segundo os autores do projeto (Daitx 2017), houve uma dificuldade de encontrar fabricantes de esquadrias para o porte do projeto MiniMOD. Ou se encontram empresas de esquadrias de grande porte que produzem em grande escala ou empresas menores, mas que não apresentam infraestrutura para atender a demanda.

E por conta disso, um dos gargalos encontrados durante a produção dos módulos em fábrica foi a demora e a má execução das esquadrias entregues. Pelo processo milimétrico dos painéis CLT, qualquer diferença de tamanho das esquadrias poderia resultar em um problema futuro para o encaixe no MiniMOD e foi o que aconteceu. Como possível resposta a essa questão, os arquitetos apontam a possibilidade de firmar parcerias com algumas empresas, para que estas já estejam cientes e adaptadas para este tipo de projeto.

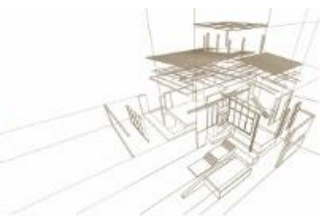
Ainda no processo de montagem dos módulos em fábrica, percebeu-se que alguns produtos e sistemas tiveram que ser adaptados para o uso em painéis CLT. Como por exemplo interruptores, boa parte encontra-se disponíveis para o uso em sistemas convencionais em alvenaria ou sistemas *steel frame* com placas de gesso acartonado. Portanto, fez-se necessário adequá-los nos módulos MiniMOD (Daitx 2017).

Quanto ao processo de montagem no local, percebe-se a necessidade de uma mão de obra capacitada para se trabalhar com produtos industrializados em madeira. Em função da precisão milimétrica dos painéis e módulos em CLT, o mesmo cuidado em respeitar medidas e eixos presentes no projeto se faz importante. Em função da má execução da fundação no local, que deveria ter respeitado os eixos e medidas apontadas no projeto, percebeu-se enorme dificuldade em conectar os módulos. E por isso, refez-se toda a locação dos pontaletes.

O uso de sistemas e produtos industrializados, não só em madeira, mas qualquer outro tipo de material, requer uma mão de obra capacitada em todas as etapas do processo produtivo para evitar retrabalhos e o aumento de custo em decorrência desse tipo de deficiência.

Retirando a fase de desenvolvimento de projeto, se as etapas que englobam o processo produtivo em fábrica e o processo de montagem no local estiverem em conformidade, seria possível entregar os módulos do MiniMOD em questão de semanas. Mas justamente em função de atrasos na entrega de componentes, má execução dos produtos, adequações ao painel CLT, o prazo estipulado passou para meses. Portanto, o prazo total, entre desenvolvimento de projeto e entrega no local, totalmente instalado, é de 03 meses.

Por fim, um aspecto relevante na discussão sobre construção em madeira, especificamente sobre os painéis CLT, diz respeito aos custos da obra. Como no



momento da produção e montagem do MiniMOD só havia uma fábrica produtora de painéis, o custo médio dos painéis CLT adotado é o mesmo valor de vigas e pilares em madeira lamelada colada, ou seja, aproximadamente R\$ 5.000,00/m³ (Leite, Santos and Valle 2017).

O custo dos painéis se deve a alguns fatores, como: *a) disponibilidade de matéria-prima, a espécie utilizada encontra-se em estados distintos de onde está localizada a fábrica, o que acarreta um aumento de custo em relação ao frete; b) processo de secagem das pranchas de madeira; c) alta incidência de impostos por se tratar de um produto industrializado (ISS, ICMS, IPI); d) uso de equipamentos com alto valor de investimento, como máquina CNC de 05 eixos.*

Segundo os autores do projeto, o custo do MiniMOD é de R\$ 6.000,00/m², considerando os modelos instalados na Fazenda Catuçaba (SP), em 2015, de aproximadamente 42m² (Daitx, 2017). É um custo elevado para casas ou refúgios de alto padrão. Porém, vale ressaltar, que o módulo é entregue praticamente pronto, incluindo armários, bancadas, lareiras, mobiliários e outros tipos de acabamento.

6. CONCLUSÕES

A utilização de painéis *cross laminated timber* (CLT) na construção civil otimiza a construção no tempo de obra, na diminuição de resíduos, na contribuição ao resgate de CO₂ da atmosfera e na redução da mão de obra.

Apesar da difícil aceitação da madeira como produto na construção e dos obstáculos em decorrência da ainda recente produção com painéis CLT, o Brasil dispõe de um cenário extremamente favorável para o uso desse material. O seu imenso território e diversidade de espécies contribuem de maneira significativa. Assim, apesar de todos os problemas esse ciclo para a coibição de seu uso na construção civil encaminha-se de maneira devagar e contínua para a sua valorização.

Segundo Berriel (2009), a madeira teria sim uma aceitação e difusão no mercado, mas para isso os profissionais deveriam atingir às “expectativas dos usuários, dentre as quais podemos destacar conforto, durabilidade e beleza”, e que atualmente o esforço dos profissionais é real, dentro das universidades e fora delas para alcançar esse objetivo. O escritório binacional MAPA reafirma esse pensamento, quanto ao CLT, e mostra com o MiniMOD que é possível construir com esses painéis destacando o conforto, durabilidade e a beleza.

Quanto ao processo produtivo, o Brasil já possui uma produção em ascensão com a fábrica dos painéis CLT, localizada em Suzano (SP) e o aumento de obras nos últimos anos tem despertado o interesse de outras fábricas e possivelmente terá sua produção difundida.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos arquitetos do escritório MAPA pela colaboração na entrevista. À Universidade de Brasília pelo apoio institucional no desenvolvimento da pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berriel, A (2009). Arquitetura de madeira: reflexões e diretrizes de projeto para concepção de sistemas e elementos construtivos. 2009. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009;

Casas de Catuçaba (2018). Casas de Catuçaba: Viver com natureza, 2018. Disponível em: <http://www.casasdecatucaba.com.br>. Acesso em jun. 2019.

Crosslam (2019a). *Cross laminated timber*: informações técnicas. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=downloads>. Acesso em junho 2019a;

Crosslam (2019b). Processos. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=content/processo>. Acesso em junho 2019b;

Daitx, M. C (2017). Quando a realidade cruza o imaginário: a aplicabilidade da arquitetura móvel nas cidades contemporâneas. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017;

Departamento Nacional de Transportes (DNIT). Resolução N° 1. Diário oficial da União (D.O.U), jan. 2016. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>. Acesso em junho 2019;

Fabício, M. M. (2013). Industrialização das construções: revisão e atualização de Conceitos. Revista Pós, v.20, n.33, p. 228-248, 2013;

Leite, T. M.; Moraes, A. C; Sánchez, J. M. M. (2018a) Industrialização, racionalização e arquitetura em madeira. Brasília, 2018. 21 slides: color;

Leite, T. M.; Moraes, A. C; Sánchez, J. M. M (2018b). Madeira lamelada colada cruzada. *Cross laminated timber*: panorama construtivo. Brasília, 2018. 51 slides: color;

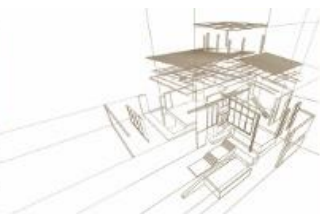
Leite, T. M; Sánchez; J. M M.; Blumenschein, R N (2018). O processo produtivo de painéis estruturais em *cross laminated timber*. EBRAMEM-CLEM 2018, São Carlos, Brasil, 2018;

Leite, T. M; Santos, P. A. F. M.; Valle, I. M. R (2017). O uso da madeira laminada colada no Brasil: panorama e desafios. CLEM-CIMAD 2017, Junín, Argentina, 2017;

Mapa (2019). Mapa, 2018. Disponível em: <https://mapaarq.com>. Acesso em jun. 2019.

Moraes, A. C (2018). Madeira: material do futuro. Brasília, 2018. 30 slides: color; 96cm x 54 cm;

Oliveira, G. L (2018). *Cross laminated timber (CLT)* no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo de projeto arquitetônico, 2018. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.



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: juanjosefontana@fadu.edu.uy

Resumen

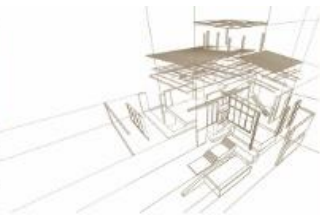
Se diseña un procedimiento de modelado paramétrico y de fabricación asistido por computadora para cubiertas laminares con materiales nacionales derivados de la madera, adaptado a la tecnología y a las condicionantes de nuestro medio. A través de una serie de experimentos de *form finding* se hallan formas 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 positivamente 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

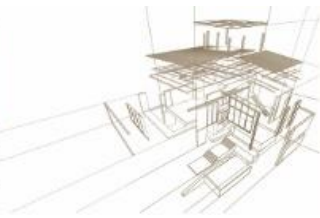
En las últimas décadas, han aparecido en el mundo una gran cantidad de estructuras de formas complejas optimizadas estructuralmente, que buscan aprovechar al máximo las propiedades de los materiales que la tecnología actual permite diseñar y producir, entre los que se encuentran aquellos derivados de 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.

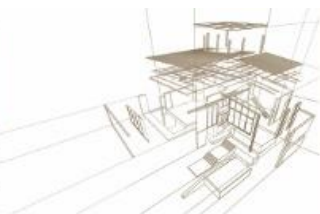
Un motivo o célula básica es un dibujo lineal simple, que contiene la información necesaria para plegar un trozo de papel: valles y montañas. Un patrón básico es un modelo de plegado de una hoja de papel que surge de la repetición de un motivo, con un ritmo regular (Jackson 2013). Los patrones básicos 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.



CLEM

2019

18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

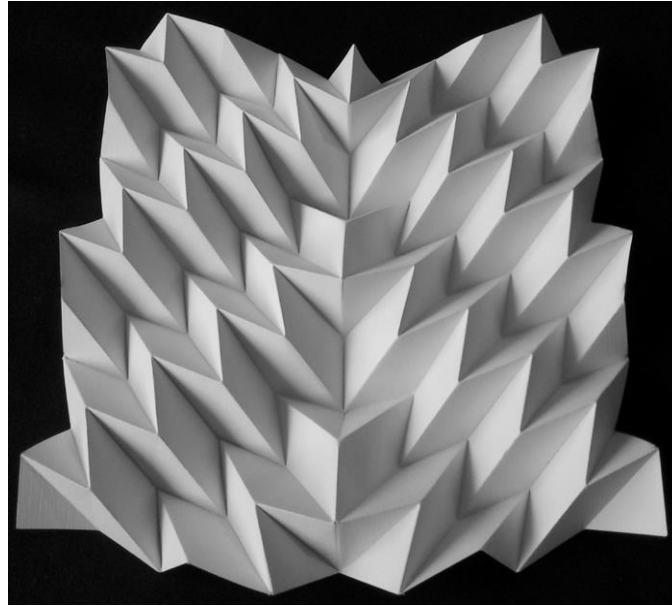


Figura 1: Plegado en V con rotaciones y desplazamientos.

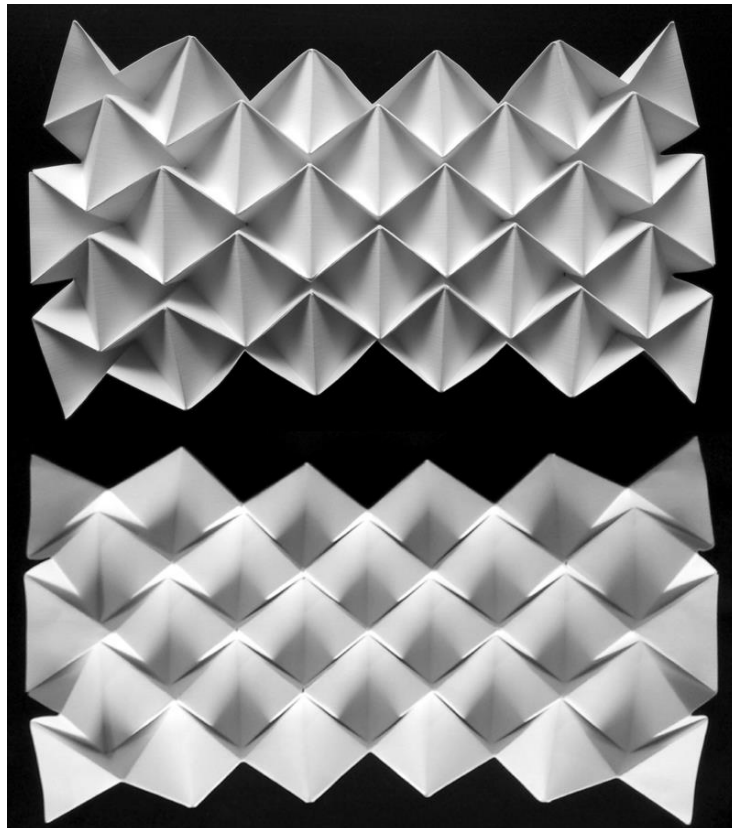
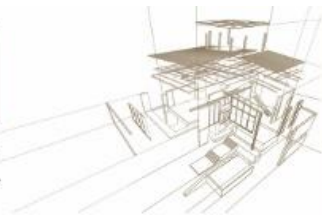


Figura 2: Retícula con pliegues en cruz, sin distorsiones.



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

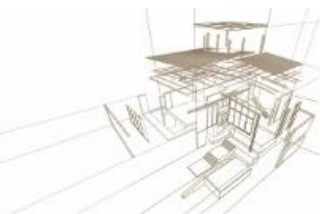
La definición de un procedimiento de modelado paramétrico implica generar un algoritmo en el que estén interrelacionados todos los elementos o parámetros involucrados en la conformación morfológica de la(s) cubierta(s) laminar(es). La indeterminación numérica entre singular y/o plural obedece al hecho 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

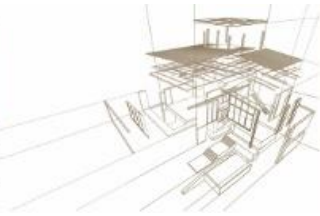
A efectos de explorar el potencial arquitectónico de las cubiertas plegadas de madera como solución de medianas o grandes luces en edificios educativos, durante el primer semestre de 2019 se trabaja en colaboración con un equipo de docentes del Taller Danza (FADU-UdelaR) en el dictado del curso “Proyecto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

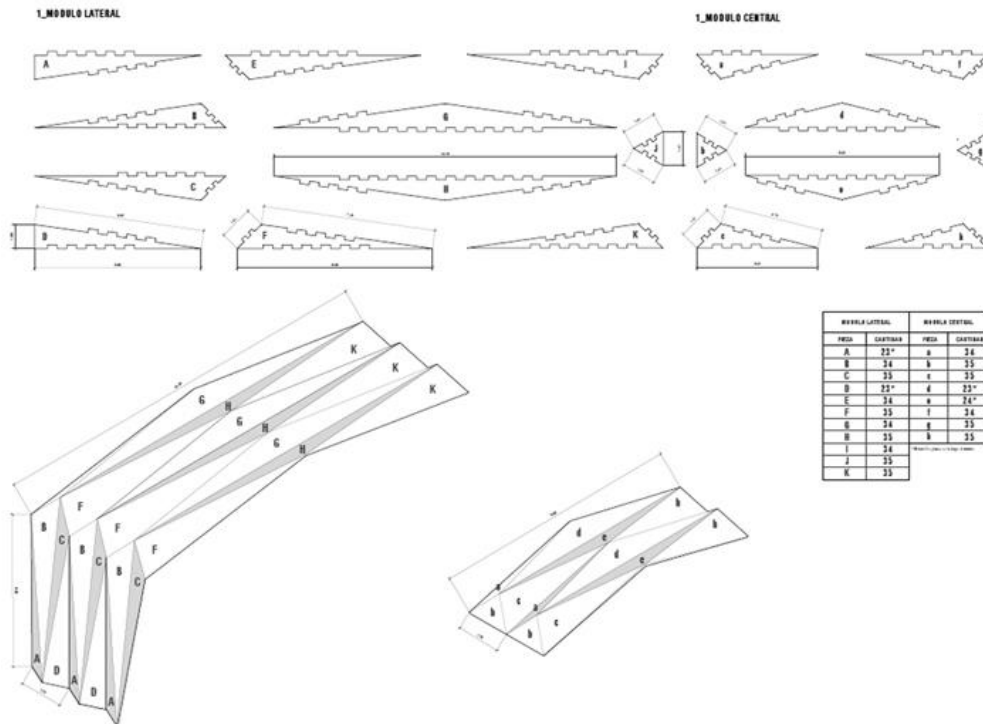
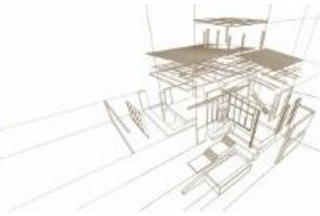
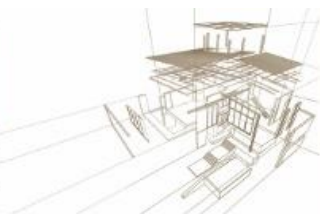


Figura 6: Centro de Investigación. Autores: Giuliana Rodríguez y Joaquín Roybal.



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.

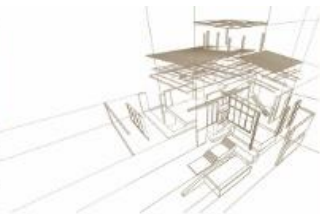
MORENO, P. y FERNANDEZ-LLEBREZ, J. (2017). Aportaciones de los modelos físicos al desarrollo y construcción de las estructuras laminares en el s. XX. Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, San Sebastián, España, Vol. 2, págs.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



.DISEÑO Y VALIDACIÓN PRELIMINAR DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA VIVIENDAS BASADO EN PANELES DE MADERA TENSADA: XILO-TENS

DESING AND PRELIMINARY VALIDATION OF STRUCTURAL SYSTEM FOR HOUSING BASED ON TENS WOOD PANELS: XILO-TENS

Mauricio Vargas Mosqueda ^{(1)*}; Ricardo Picón ⁽²⁾

^{(1)*}Mag. Arq. Académico Departamento de Ciencias de la Construcción. Facultad de Arquitectura Construcción y Diseño. Universidad del Bio Bio, Chile.

⁽²⁾Dr. Ing. Civil. Ricardo Picón. Profesor Facultad de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad Católica de Temuco.

*Contacto: mvargas@ubiobio.cl

Resumen

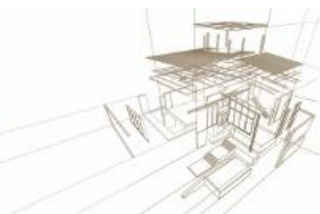
Ante el gran déficit habitacional hoy en día existente en Latinoamérica urge plantear soluciones sustentables. Es por ello que la presente investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema constructivo estructural para la construcción sustentable de viviendas en madera denominado XILO-TENS. Este se concibe como un sistema de prefabricación liviana que permite la construcción de viviendas de hasta dos pisos de altura, mediante un montaje fácil y rápido. Su concepto permite el diseño de múltiples configuraciones espaciales a partir de una tipología mixta de muros portantes y vigas fabricados con madera sólida tensada, utilizando procesos de baja tecnología que permiten un fácil uso y apropiación por parte de la población en general. La propuesta en sí se enfoca, tanto el diseño del sistema estructural, como en la validación preliminar en cuanto a resistencia mecánica, de sus principales componentes constructivos. La investigación concluyó que el sistema se perfila como una alternativa factible a ser implementada.

Palabras-Clave: Vivienda, madera, sostenibilidad, sistemas constructivos, madera tensada

Abstract

In view of the great housing deficit that exists today in Latin America, it is urgent to propose sustainable solutions. That is why this research focuses on the development of a structural construction system for the sustainable construction of wood houses called XILO-TENS. This is conceived as a lightweight prefabrication system that allows the construction of houses up to two stories high, through easy and fast assembly. Its concept allows the design of multiple spatial configurations from a mixed typology of load bearing walls and beams made of tensioned solid wood, using low-tech processes that allow easy and appropriate use by the general peaple. The proposal itself focuses, both on the design of the structural system, and on the preliminary validation in terms of mechanical resistance of its main construction components. The investigation concluded that the system is emerging as a feasible alternative to be implemented.

Keywords: Housing, wood, sustainability, construction systems, wood tens.



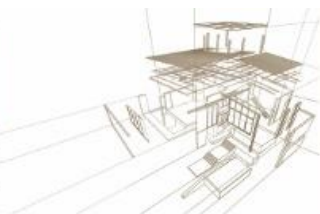
1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la construcción con madera ha alcanzado un importante desarrollo tecnológico en los países industrializados con alta tradición en el uso de este material. Sin embargo, pensar en su implementación en Latinoamérica implica superar barreras culturales, sociales, políticas y tecnológicas que limitan su uso y aceptación general. Aun así, en la actualidad resulta importante asumir este reto en función de alcanzar un desarrollo realmente sustentable. En este sentido se plantea como proyecto, el desarrollo de un sistema constructivo estructural para la construcción sustentable de viviendas denominado XILO-TENS, el cual se concibe como un sistema mixto constituido por muros portantes y vigas que permiten la configuración de vanos de hasta 2.40 m. Estos elementos son construidos a partir de elementos de madera sólida tensada fabricados mediante procesos de baja tecnología con la finalidad de facilitar su producción. Su concepto permite el diseño y construcción de una variedad de configuraciones para viviendas de hasta dos pisos de altura a partir de pocos elementos estandarizados que se adaptan y fijan mediante sencillos procesos manuales realizados en sitio y responden a un montaje fácil y rápido. Su producción se plantea en forma prefabricada con materiales de fácil adquisición y mediante procesos de poca complejidad que no requieren el uso de adhesivo. Aun cuando los resultados fueron altamente satisfactorios es importante destacar que el presente trabajo muestra lo relativo a la fase de diseño y validación preliminar del sistema, quedando aun por desarrollar protocolos de validación definitiva para su puesta a punto final.

2. METODOLOGÍA

El problema de investigación se define a partir de la pregunta: ¿Es posible implementar elementos de madera tensada como componentes estructurales para la construcción de viviendas en forma masiva y sostenible? En este sentido se establece como objetivo de investigación el diseño y validación preliminar de un sistema constructivo estructural a partir de elementos de madera tensada. Así, desarrollo del concepto se inició con un proceso intuitivo o “diseño original a priori” (Riba 2002), sustentado en el planteamiento de una necesidad inicial y en el bagaje experiencial del autor. De esta manera, como objetivos específicos se plantean: 1) Aportar una solución eficaz, eficiente y de calidad para la construcción masiva de viviendas; 2) Desarrollar un diseño bajo criterios de sustentabilidad, adaptado a recursos tecnológicos y materiales asequibles; 3) Flexibilizar la configuración y diseño de espacios arquitectónicos; 4) Desarrollar sistemas y elementos constructivos que respondan a criterios de prefabricación liviana. En función de esto se prosigue en primer lugar, al diseño conceptual y detallado del sistema a partir del análisis de la necesidad y el estudio de antecedentes directos e indirectos, para luego proceder a la validación estructural preliminar de los componentes principales del mismo a través de prototipos físicos ensayados empíricamente.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO



Es un sistema estructural en madera de prefabricación liviana que permite la construcción de viviendas de hasta dos pisos de altura a través de un montaje fácil y rápido. Su concepto permite el diseño de múltiples configuraciones espaciales a partir de una tipología mixta de muros portantes y vigas. Los componentes del sistema son fabricados por medio de listones de madera de Pino Caribe (*Pinus caribaea*) unidos en forma transversal por barras roscadas galvanizadas (madera tensada) (Giuliano y otros, 2011). Estos son fabricados en forma seriada y estandarizada mediante procesos de mecanizado y ensamblaje de poca complejidad. El sistema adquiere una alta estabilidad y resistencia a cargas gravitatorias y horizontales al configurar estructuras a partir de muros portantes arriostrados por vigas que se conectan a estos en forma continua mediante un sencillo método constructivo y en nodos específicos mediante herrajes metálicos como refuerzo sismo-resistente. Las vigas dispuestas a lo largo de los muros permiten generar vanos para puertas y ventanas de luces de hasta 2.40 m. Asimismo, la luz máxima de los espacios configurables se limita a 3.60 mts en función de la coordinación modular del sistema y del largo máximo comercial de los listones de madera sólida que las componen. Los componentes son fabricados en forma estandarizada y con dimensiones variables de acuerdo a una coordinación modular establecida.

3.1. Coordinación modular y dimensional

La coordinación modular del sistema se establece en función de las dimensiones útiles de los componentes constructivos las cuales son determinadas por su capacidad estructural, peso y composición. En este sentido todos los componentes se estandarizan a una dimensión de 225 mm x 90 mm dado por la disposición consecutiva de cinco listones de madera cepillada de 45 mm x 90 mm Tanto las dimensiones como la orientación de los muros de carga definen un sistema ejes modulares referidos a la distancia entre caras (Del Águila García, 2006) de los muros en un sentido y referido a los cantos de los muros en el otro. Con una zona muerta o ancho de ejes de 225 mm en un sentido y de 90 mm en el otro. La distancia interior entre ejes modulares es definida por módulos de 225 mm.

3.2. Criterios generales para el diseño de los componentes constructivos

Con la finalidad de plantear un elemento constructivo sustentable y elaboración masiva, se propone el desarrollo de los paneles a partir de maderas de rápido crecimiento y bajo costo. En este caso se propone utilizar el Pino Caribe (*Pinus caribaea*); especie existente en muchos países de Centro América, así como en México y Venezuela y que corresponde al tipo estructural "C" según la clasificación establecida por la JUNAC (JUNAC 1998). Este pino posee propiedades físico-mecánicas muy similares a otras especies del mismo género utilizadas en otras regiones de América como el pino Radiata (*Pinus radiata*) en Chile y pino Eliotis (*Pinus elliottii*) en Argentina y Uruguay (JUNAC 1998). Asimismo, para la conformación de las placas tanto de muros como vigas, se plantea el uso de elementos de madera cepillada y seca al 12%, sin rigurosos procedimientos de selección, limitándose a una clasificación visual básica que evite la presencia de nudos muertos y grietas. La unión entre los listones se plantea a través de



varillas roscadas galvanizadas de media pulgada (1/2") de diámetro, como tensor transversal. Se selecciona éste elemento tanto por su amplia comercialización y fácil adquisición, como por su resistencia a la corrosión, lo que garantiza una alta durabilidad del componente en el tiempo. Su fijación se plantea a través del uso de tuercas y doble arandela (plana y de presión). En cuanto a la manufactura del panel se busca que estos puedan ser fabricados con baja tecnología, lo que implica procesos sencillos que no requerían de equipos y maquinarias sofisticadas. De esta manera la fabricación solo requerirá de procesos de mecanizado básicos como corte, cepillado, canteado y perforado. Por otro lado, los componentes se fabrican en forma estandarizada según su función. Solo los componentes dispuestos en nodos estructurantes son adaptados en el sitio, según su condición específica de ubicación y conexión, mediante sencillos procesos de mecanizado manual implementados al momento del montaje.

3.4. Componentes del sistema

3.4.1. Panel vertical

El panel vertical tiene tanto una función portante como función de cerramiento. Se encuentra constituido por cinco listones cepillados de 45 mm x 90 mm x 2.20 m. Así, las dimensiones para el panel se establecen en 90 mm de espesor por 225 mm de ancho y 2.20 m de alto, y. Se plantea el armado del panel a través de 4 pernos de 1/2" de diámetro con distanciamiento mínimo de cada extremo de apoyo de 10 cm y distanciamiento entre pernos de 66.5 cm.

3.4.2. Panel vertical de antepecho

Posee las mismas interfaces de ensamblaje que el panel de altura completa. Se dimensiona a 900 mm de altura como antepecho de ventanas.

3.4.3. Viga

La viga posee una sección de 90 mm x 225 mm, por un largo variable en función de la luz requerida y la coordinación modular. Se encuentra constituida por cinco listones cepillados de 45 mm x 90 mm unidos a través de 5 pernos ubicados en los extremos a 100 mm con respecto al borde de la cara interna y con un máximo de 650 mm en puntos intermedios. Se ubica a nivel superior y a lo largo del muro fungiendo como elemento arriostrante del muro o como dintel en vanos de puertas y ventanas.

3.4.4. Panel de entrepiso

El panel de entrepiso se plantea también como un elemento tensado de 225 mm de ancho, compuesto con 5 listones de 45 mm x 45 mm a excepción del listón central el cual posee una altura mayor de 140 mm por razones estructurantes (Figura 1).



Figura 1: Panel de entrepiso



3.5. Ensamblajes y conexiones

3.5.1. Conexión a cimentación

El tipo y las dimensiones de la cimentación va a depender del tipo de suelo. Dada la tipología estructural propuesta se recomiendan zapatas corridas o losas de fundación. En este sentido las conexiones se diseñan en forma sencilla a través de una solera basal de madera tratada dispuesta a lo largo del muro (Figura 2). Asimismo, en el punto correspondiente a nodos de refuerzo entre vigas y muros se plantea el uso de un conector especial fabricado con un UPN de 80mm apernado a la cimentación y al panel de madera mediante un rebaje a media madera.

3.5.1. Conexión entre componentes

La conexión entre las vigas y el muro se plantea a través de lengüetas de tablero contrachapado de 18 mm (ver Figura 7) con clavos de refuerzo transversal. Asimismo, la unión entre los elementos verticales que componen el muro se propone a través de placas de tablero contrachapado clavadas (Figura 5). En los nodos de refuerzo se implementan conexiones de acero ocultas fijadas con pasadores metálicos (Figuras 6, 7 y 10). La unión entre muro transversales se hace a través de la disposición de dos paneles en forma de “T” mediante pernos que se acoplan desde el canto de uno de los componentes hasta una caja dispuesta en el centro del otro, la cual permite la fijación de la tuerca (ver Figura 3)

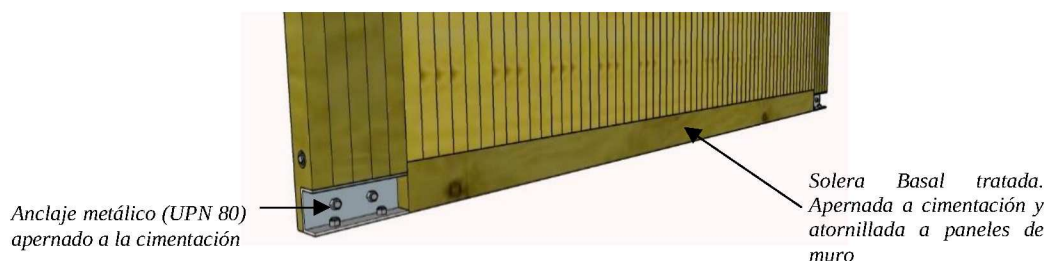


Figura 2: Anclaje de muro a Cimentación corrida

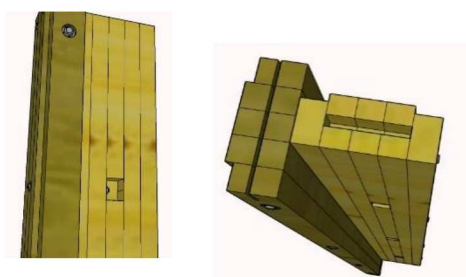


Figura 3: encuentro en “T” entre componentes ubicados en extremos del muro.

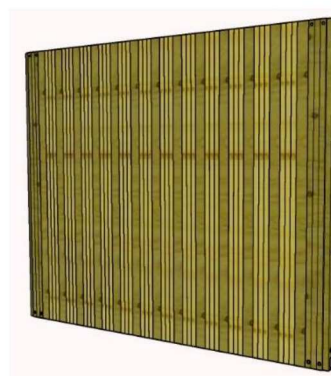
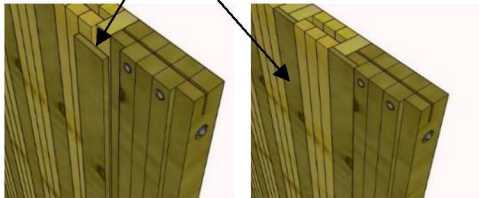


Figura 4: Configuración muro vista cara exterior



Lengüeta de ensamble entre paneles de muro. De contrachapado 18 mm clavada



Caja para acople de lengüeta de contrachapado de 18 mm

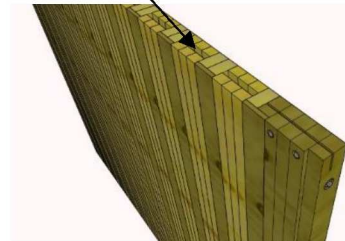


Figura 5: Lengüeta de ensamble entre paneles de muro. Hecha de contrachapado 18 mm (clavada)

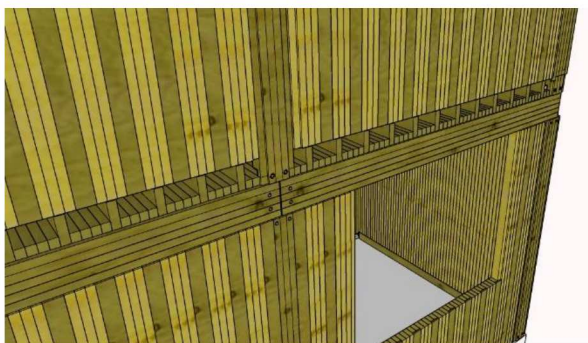


Figura 6: Detalle de losa y muros de segundo piso sin revestir

Anclaje con herraje metálico en nodo. Caja para acople de lengüeta de contrachapado de 18 mm

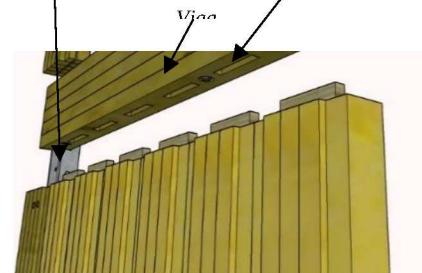


Figura 7: Ensamble Muro-Viga

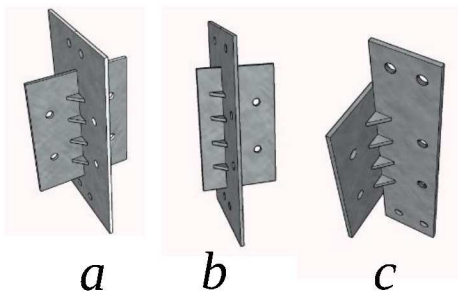


Figura 8: Herrajes de refuerzo en nodos Viga-Muro: Central, lateral y Esquina,

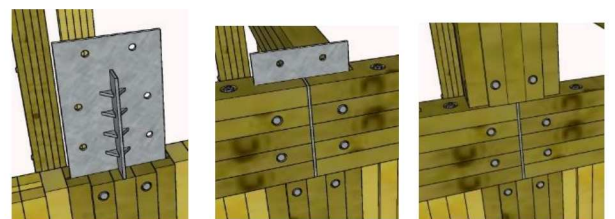


Figura 9: Secuencia de ensamble de conexión de refuerzo en nodos.



4. Descripción del proceso productivo de prototipos experimentales

Para la construcción de los prototipos se utilizó un molde de madera construido ad hoc y prensas manuales (sargentos), con los cuales se pudo fabricar tres componentes al mismo tiempo (Figura 10). La fabricación se hizo colocando los cinco listones en el molde para luego proceder a prensarlos y luego perforarlos en una sola operación. Luego de la perforación, en el mismo molde, se procedió a colocar los pernos, arandelas y tuercas para posteriormente apretarlos con herramientas manuales (rache) en un proceso práctico, sencillo y eficiente (véanse Figuras 10 y 11).



Figuras 10 y 11: Procesos de perforado y tensado.

Figura 12: Producción seriada de prototipos para ensayos

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Ensayos de compresión longitudinal

El elemento portante se diseñó como componente estructural que resiste cargas verticales en forma longitudinal a las fibras de la madera (Figura 13). Para efectos del ensayo a compresión longitudinal el elemento se confeccionó siguiendo las especificaciones establecidas en el diseño preliminar. Inicialmente los elementos se comportaron elásticamente, ya que después de cada descarga no experimentaron deformaciones permanentes.

De la Figura 18, se puede decir que este comportamiento se observó hasta una fuerza aproximada de 14.000 Kgf. en donde se registró un acortamiento de 0,12 mm. Finalmente, se alcanzó una fuerza de 19.900 Kgf. para un desplazamiento vertical de 5,4 mm, obteniéndose, luego de la descarga, un acortamiento de 0,4mm. En tal sentido es posible concluir que el elemento portante propuesto puede ser usado en el diseño de viviendas, tanto en un sistema aperticado como en la conformación de muros.



Figura 13. Elemento portante al inicio del ensayo.

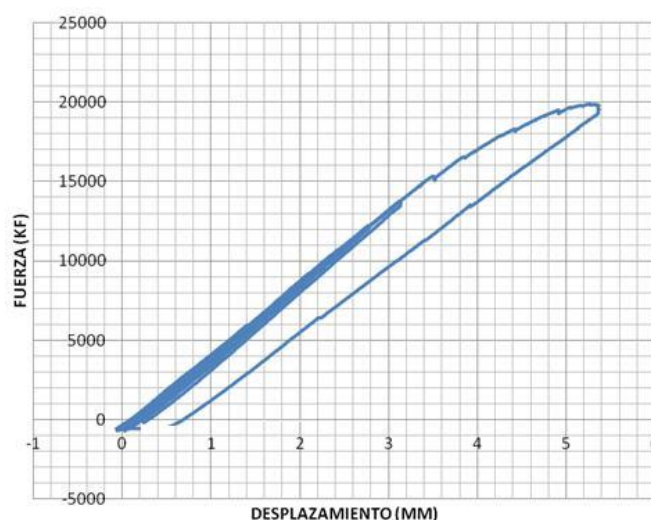
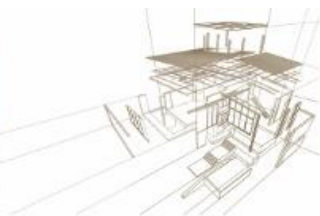


Figura 14. Gráfica experimental del elemento nortante de madera tensada.

5.2. Ensayos de flexión

La viga se propone como elemento estructural que resiste cargas verticales a lo largo de su longitud. Para comprobar la altura óptima de la viga se hicieron ensayos con vigas de 3 alturas distintas (225 mm, 270 mm y 315). En la Figura 16 se observa que la viga de 225 mm de altura alcanzó una carga máxima de 1.197 Kgf. con un desplazamiento vertical en el centro de 1.80 cm. Mientras que las vigas de 270 mm y 315mm para un desplazamiento de 2.60 cm lograron resistir 1.724 Kgf. y 2.299 Kgf. respectivamente. Durante el ensayo las vigas mostraron un comportamiento dúctil, ya que para la de sección de 270 mm y 315 cm de altura se logró una carga máxima de 2.737 Kgf. y 3.597 Kgf. sin llegar a la fractura del componente, sin embargo, el ensayo se detuvo debido a que los desplazamientos obtenidos serían excesivos para el diseño de vigas con la longitud propuesta. En función de los resultados obtenidos el elemento viga de 315 mm tuvo, como se esperaba, mejores resultados, pues con este se logró reducir la flecha para un valor de carga similar entre los componentes ensayados. Además, si se considera como flecha admisible como $L/300 = 0,80$ cm, este elemento es capaz de soportar aproximadamente una fuerza puntual en el centro de la luz de 1.000 Kgf. Por lo tanto, para el diseño de viviendas en base a elementos de madera tensada se recomienda establecer una configuración estructural con una longitud máxima de 2.40 m, con el fin de mantener el control de la flecha dentro de los límites establecidos tanto en la conformación de vigas como en dinteles. Por otro lado, es importante destacar que la excesiva flexión de las vigas se produjo debido al desplazamiento longitudinal observado entre los listones. Lo que permite concluir que el solo apernado planteado por simplificación constructiva no es suficiente. De manera que se considera que colocando



conectores de corte entre los listones que componen la viga, el desplazamiento se restringiría totalmente, optimizando así el comportamiento del componente constructivo. Así mismo el ensayo no consideró el empotramiento en los extremos de la viga lo se considera también puede contribuir con la eficiencia de la misma.

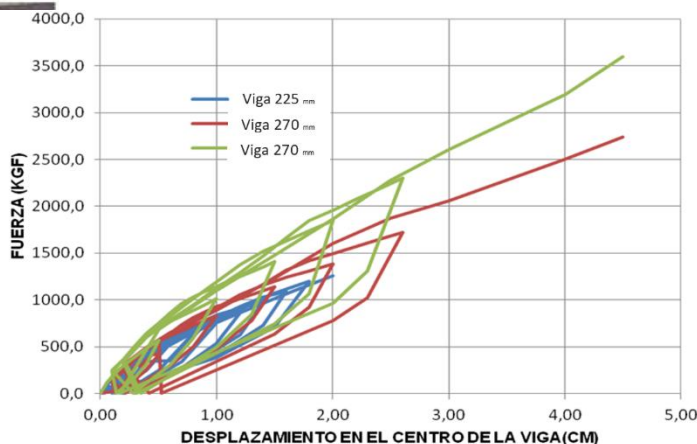


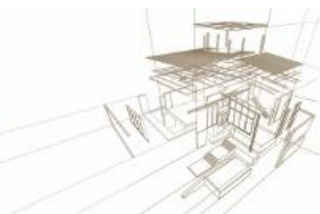
Figura 15. Elemento viga de 30 cm de altura al inicio y final del ensayo

Figura 16. Gráfica experimental de los elementos de viga de madera tensada.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño y validación preliminar del sistema constructivo Xilo-Tens cumplió con los objetivos principales establecidos para el proyecto, los cuales buscaban en principio aportar una solución eficaz, para la construcción prefabricada de viviendas sustentables adaptándose a recursos tecnológicos y materiales asequibles en países Latinoamericanos. Bajo estos criterios se pudo concebir una propuesta factible, que implementa una mínima cantidad de componentes constructivos estandarizados que permiten la construcción de múltiples configuraciones estructurales. La construcción de prototipos de componentes permitió comprobar la sencillez de los procesos de fabricación.

En cuanto a la composición de los elementos constructivos verticales, de manera específica podemos concluir, que el uso de pernos (tensores) garantiza que los listones de madera se comporten como un elemento estructural sólido y estable, ya que en los ensayos experimentales no se observó separaciones entre listones o fallas en los pernos. En cuanto a las vigas se recomienda buscar opciones constructivas que optimicen su



comportamiento estructural para lograr un ancho igual al de los elementos verticales. Así mismo las cargas máximas soportadas por los componentes, deformaciones y modos de falla observados en los ensayos, permiten concluir que estos podrían ser usados como elementos estructurales para viviendas. La propuesta planteada implica una solución de énfasis tecnológico que contribuye al desarrollo de viviendas sostenibles. El desarrollo y aplicación de sistemas constructivos a partir de estos elementos facilitará la implementación de políticas de auto gestión y auto construcción de viviendas por parte de la población, permitiendo alcanzar una solución que integre de manera acertada los aspectos económicos, ambientales y sociales requeridos para la sostenibilidad.

Por último es importante destacar que para el diseño definitivo del sistema se hace imprescindible la validación tanto de las conexiones como del panel de entrapiso. Sin embargo, el proceso de validación preliminar el cual consistió en la determinación de las capacidades de resistencia de los componentes principales del sistema a través de ensayos experimentales, nos permite asegurar que éste se perfila como una solución eficaz y eficiente para la construcción sustentable de viviendas en países en desarrollo.

En definitiva, la propuesta tecnológica constituye una solución pertinente para la construcción sostenible de viviendas en el contexto ambiental, social y económico de América Latina como región emergente y en desarrollo con uno de los mayores potenciales de crecimiento poblacional a nivel mundial.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido desarrollado en el Centro de Investigaciones de la Vivienda y el Hábitat de la Universidad de Los Andes, Venezuela, bajo el financiamiento del Fondo Nacional para la Ciencia y la Tecnología (FONACIT) y el CDCHTA-ULA con el código: A-760-10-09-C. Asimismo, debe destacarse la colaboración en la realización de los ensayos experimentales, del Laboratorio de Productos Forestales, ULA, del Laboratorio de Materiales y Ensayos de la Escuela de Civil de la Facultad de Ingeniería, ULA, y del Laboratorio de Mecánica Estructural, UCLA.

BIBLIOGRAFÍA

Brettstapel Construcción, recuperado en marzo 2012 de <http://www.brettstapel.org>

Del Águila García, A (2006). Industrialización de la edificación de viviendas. Marea Libros, Madrid, España.

Giuliano M. y otros. (2011). Manual de diseño, construcción, mantención y monitoreo de tableros de Madera tensado. Recuperado el 3 de febrero de 2012 de <http://www.cttmadera.cl>.

Hempel R., Poblete C. (1994). Cuaderno de la edificación en madera N°7: Sistemas estructurales en madera. Concepción, Chile: Universidad del Bio Bio.

Hempel, R. (2008). Sistemas constructivos de madera sólida, Universidad del Bio Bio, Concepción, Chile.



Hurtado, J. (2000). Metodología de la Investigación Holística, IUTC-SIPAL, Monagas, Venezuela.

JUNAC. 1984. Manual de Diseño para Maderas del Grupo andino. Junta del Acuerdo de Cartagena. PADT-REFORT. 1984. Lima, Perú. 205.

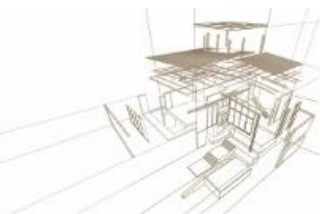
Mc Donnell , H. (1999). Manual de construcción industrializada. Revista vivienda SRL, Buenos Aires, Argentina

ONU-HABITAT. 2017. Viviendas y asentamientos precarios. En línea: <http://es.unhabitat.org> Recuperado: 19/3/2017]

Programa 21. (1992). Recuperado el 25 de junio de 2014 de: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21>

Riba C. (2002). Diseño Concurrente, EDICIONS UPC, Cataluña, España.

Salas J. (2000), La industrialización posible de la vivienda latinoamericana. ESCALA, Bogotá, Colombia.



MÓDULO HABITACIONAL TRANSPORTABLE DE USOS MÚLTIPLES CONSTRUIDO EN MADERA

MULTI-PURPOSE TRANSPORTABLE HOUSING MODULE BUILT IN WOOD

Borghello, Jeremías ⁽¹⁾; Ricci, Luis A. ⁽²⁾; Barsotelli, Francisca ⁽¹⁾; Fortunato, Germán A. ⁽¹⁾;
Gutiérrez, Brenda ⁽¹⁾; Ortega, Nehuen ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Investigación en Viviendas – UTN FRLP. La Plata, Argentina

⁽²⁾ Mag. Ing. Civil Grupo de Investigación en Viviendas – UTN FRLP. La Plata, Argentina

* Contacto: jeremiasborghello@hotmail.com

Resumen

En Argentina existe un gran déficit relacionado a la rama de la Ingeniería Civil cuyo objetivo es brindarle un espacio al hombre. Personas con necesidad habitacional insatisfecha, obras temporales en caso de inundaciones, infraestructura hospitalaria y edificios educativos. Para dar solución a estas problemáticas el Grupo de Investigación en Viviendas (GIV) de la UTN Facultad Regional La Plata, recurrió a la implementación del sistema *Platform-frame*. Este método constructivo propone viviendas sustentables, amigables con el medio ambiente, posee una mayor aislación que la construcción convencional y por ende contribuye al ahorro energético. Se elige trabajar en madera debido a que es un material natural, renovable, reutilizable y reciclable. Las tres especies utilizadas en las diferentes edificaciones realizadas por el GIV en conjunto con el LIMAD de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, han sido *Eucalyptus Grandis*, Pino Elliotti (*Pinus elliottii*) y Sauce (*Salix*), siendo el empleo de esta última especie una innovación desde el punto de vista de la construcción debido a que su uso se restringe principalmente al armado de cajones y mimbrería. Se propuso la utilización del sistema para la creación de un módulo transportable de usos múltiples: viviendas unifamiliares con alto aprovechamiento del espacio reducido, habitáculo para propiciar un servicio de alojamiento de los evacuados en catástrofes climáticas, sala de emergencias transportable, y aula escolar en zonas rurales de rápida realización. Una vez cesada cualquiera de las actividades nombradas el módulo podrá transportarse nuevamente hasta una próxima zona de emplazamiento.

Palabras-clave: Módulo, Sauce, Platform-frame, Sustentable.

Abstract

There is a large deficit in the Civil Engineering branch whose objective is to provide space for people in Argentina. There are many people with unsatisfied housing needs, a lack of temporary shelters in case of floods, hospital infrastructure and educational buildings. To solve these problems, the Housing Research Group (HRG) of the UTN La Plata Regional College employed a Canadian system called *Platform-frame*. Work in wood is chosen because it is a natural, renewable, reusable and recyclable material. The three species used in the different buildings, carried out by the HRG together with the LIMAD of the College of Agricultural and Forestry Sciences of the UNLP, have been *Eucalyptus grandis*, Elliotti Pine (*Pinus elliottii*) and Willow (*Salix*), being the use of this last species an innovation from the construction point of view because its use is mostly restricted to drawer assembly and wickerwork. This building method provides sustainable housing, is environment friendly, supplies better insulation than conventional construction, and therefore, contributes to energy saving. The use of the system for a portable multipurpose module was proposed: single-family homes for high use of the reduced space, room for temporary lodging for evacuees in climatic catastrophes, transportable emergency room, and school classroom in the countryside. Once has ceased any of the named activities, the module can be transported again to a next location area.

Keywords: Module, Willow, Platform-frame, Sustainable.



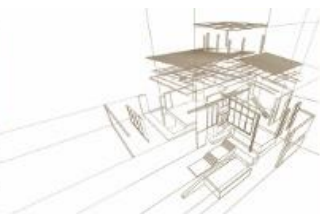
1. INTRODUCCIÓN

En Argentina existe un gran déficit relacionado a la rama de la Ingeniería Civil cuyo objetivo es brindarle un espacio al hombre. Al encontrarse la ciudad de La Plata dentro del territorio argentino no queda exento de estas problemáticas nacionales. Personas con necesidad habitacional insatisfecha, obras temporales en caso de inundaciones, infraestructura hospitalaria y edificios educativos, son los cuatro tópicos en los que incidirán el presente trabajo.

Del ensayo Escándalos Éticos (2011), de Bernardo Kliksberg se expone lo siguiente: “El 32% de los latinoamericanos habitan en viviendas precarias, con infraestructura y servicios inadecuados, tenencia de la tierra irregular y hacinamiento. En América Latina la población urbana significa el 75 % de la población total. [...] Se estima que 60 millones carecen de agua potable, 120 millones no tienen instalaciones sanitarias y los que tienen agua la encuentran altamente contaminada. En el párrafo 1 del artículo 25 de la Declaración Universal de Derechos Humanos se proclama que: “Toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, así como a su familia, la salud y el bienestar, y en especial la alimentación, el vestido, la vivienda, la asistencia médica y los servicios sociales necesarios (...)”. La cuestión de la vivienda es parte de un problema político y estructuralmente no tiene verdadera salida fuera de sus límites. Sin embargo, es válido seguir pensando la ciudad y sus componentes, polemizando y proponiendo soluciones directas a los problemas inmediatos de la mínima vivienda de interés social. Las soluciones habitacionales en la región exigen políticas públicas que consideren la correcta utilización del territorio urbano y suburbano; inversiones que jerarquicen la cohesión social ya generada en los grupos que los componen, e integración plena al sistema productivo de sus habitantes.

En el presente trabajo se procura abordar las condiciones del hábitat, mejorándolas y economizando los gastos de tiempo y dinero para la producción de módulos habitacionales con un alto aprovechamiento del espacio reducido.

El aumento de la densidad poblacional impacta fuertemente en el ambiente impermeabilizando el suelo y dificultando el escurrimiento del agua. El uso cada vez mayor de tierras marginales para cultivos inadecuados aumenta la erosión del suelo y genera inundaciones súbitas. La agricultura intensiva y el uso potente de maquinarias agrícolas que destruyen la protección vegetal del suelo junto a la deforestación de tierras con fuerte pendiente que también eliminan la cobertura vegetal que los protege; componen las principales causas de catástrofes hídricas. Según defensa civil las emergencias atendidas referidas a fenómenos hidro-meteorológicos en los últimos seis años se han quintuplicados respecto al promedio histórico. María Catalina Ramírez en Inundaciones expresa: "Las inundaciones son el mayor desastre natural que amenaza al país y representan el 60% de los desastres naturales y el 95% de los daños económicos. [...] el 80% de la población del país vive en la planicie del Paraná y del Paraguay, y el resto se ubica generalmente cerca de los cursos de agua". Este crecimiento urbano desorganizado, los factores antes mencionados y el volumen de lluvias que creció 20% entre 1961 y 2010 debido al cambio climático; contribuyen a un riesgo acrecentado de sufrir inundaciones ribereñas.

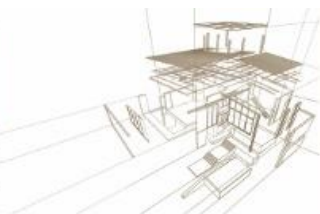


Los prototipos por desarrollar tendrán diseños en donde se propiciará un servicio para alojamiento de los evacuados y otro como sala de emergencias transportable.

La tercera rama por implementar dentro del proyecto está referida al sistema de salud. Según Mario Glanc: “Al hospital sólo deben llegar las patologías que no puedan ser resueltas en un nivel primario. Esto no está ocurriendo en la Argentina, porque al hospital se llega indiscriminadamente, [...] son al menos 14 millones los argentinos que no cuentan con ningún tipo de obra social o plan de salud y no tienen otra alternativa. En Chaco, Formosa y Santiago del Estero más de la mitad de la población no tiene cobertura de salud. En general, todo el norte argentino es la región más desfavorecida”. Además de la falta de infraestructura, la existente realizada con el sistema tradicional de construcción conlleva a un mantenimiento que no se concreta por parte del estado provocando la precarización de las condiciones laborales del personal, derivación de pacientes que usualmente se hubiera tratado en la institución por carencia de insumos o imposibilidad de realizar prácticas de diagnóstico o cirugías que antes llevaban a cabo en la institución, entre otras falencias. Consecuentemente el objetivo de este módulo construido masivamente es descomprimir el trabajo a los hospitales generando centros simples, económicos, de fácil mantenimiento, que permitirían una acción muy eficaz en situaciones de emergencias o en lugares remotos.

Abordando la última cuestión de las cuatro planteadas en esta introducción, los datos provenientes de Infraestructura escolar 2016-2025 de Cecilia Cavedo, expresan la siguiente demanda: Para el Nivel Inicial considerando la ampliación de la infraestructura para las salas de tres, cuatro y cinco años, el número de salas requeridas sería 4.952 al año 2020 y de 9.293 al 2025. En el nivel primario, la ampliación de la jornada escolar requeriría la construcción de 10.775 salas a 2020 y de 17.241 a 2025. Para cumplir con las exigencias de la Ley de Educación Nacional en el nivel secundario, se deberían construir 12.000 salas al año 2020 y 21.911 a 2025. Equivaldrían en promedio a 9.101 establecimientos: 3.098 en el nivel inicial, 2.873 en el primario, y 3.130 en el secundario. En la ciudad de la Plata faltan 71 nuevas aulas (38 para secundarias, 17 para el nivel inicial, 13 para primarias y 3 para escuelas especiales), además que el 80% de las escuelas en funcionamiento poseen graves deficiencias edilicias. Por otro lado, las escuelas de campo registran una menor tasa de promoción respecto del total nacional e índices mayores en lo que se refiere a abandono interanual y sobre - edad (ingreso tardío en la escuela). Esto se debe, entre otras razones y a la distancia que hay que vencer para llegar a muchas escuelas, a la escasa oferta educativa en el nivel inicial. Cerca del 40% de los chicos que viven en ámbitos rurales no tiene acceso a una educación secundaria, aunque es obligatoria. La propuesta del proyecto es la construcción de un prototipo, el cual será económico, de rápida construcción, cumpliendo con todos los estándares especificados en normas, reglamentos, etc. y que servirá de aula con la adición de sanitarios.

Como la solución de fondo es compleja y puede que demore demasiado tiempo hasta que impacte en forma acabada sobre cada familia, zona de desastre natural, paciente o niño, el grupo de trabajo a partir de este proyecto pretende simplificar la manera de abordar estas problemáticas con un único prototipo de fácil realización y con la diferenciación en el diseño de los tabiques internos abordando la mejora de las condiciones de habitabilidad de los sistemas existentes, realizando una valoración de las



condiciones actuales y proponiendo los cambios que de ella surgieren. Manteniendo la idea de menor costo, que involucre la autogestión del grupo afectado, la seguridad del sistema constructivo, el trabajo con tecnologías en madera, la seguridad en los sistema de calefacción y energía, la provisión de agua potable y el tratamiento de las aguas servidas, serán los conceptos principales para un mejor desempeño del prototipo realizado destinado a suplir las necesidades planteadas.

En el marco de un Proyecto de Investigación y Desarrollo (PID), durante los años 2019, 2020 y 2021 el Grupo ha propuesto como objetivo general proyectar, desarrollar y construir un módulo de usos múltiples, transportable, ejecutado en madera con el sistema denominado “*platform frame*”, empleando en la ejecución de éste, técnicas de autoconstrucción. En particular el presente artículo aborda las instancias iniciales en las cuales el Grupo se encuentra trabajando. El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer las acciones que viene desarrollando el Grupo de Investigación en Viviendas (GIV) en el área de construcciones sustentables en madera, como así también el trabajo que se propone desarrollar durante los años venideros.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se plantea para el desarrollo del Proyecto de Investigación y Desarrollo contempla los siguientes hitos principales:

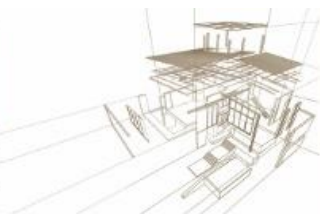
- 1) Recopilación de antecedentes
- 2) Desarrollo del Marco Teórico
 1. Estudio de las características físico-mecánicas de la madera empleada
 2. Estudio del Sistema Constructivo
 3. Diseño del prototipo
 4. Planificación de la construcción
- 3) Ejecución del módulo de usos múltiples transportable
- 4) Medición de parámetros de confort habitacional
- 5) Análisis de los resultados obtenidos y conclusión

Como fuera mencionado, a la actualidad el Grupo se encuentra recorriendo el camino de la recopilación de antecedentes y el desarrollo del marco teórico haciendo un fuerte hincapié en el diseño prototípico de tal manera de desarrollar módulos transportables y fácilmente montables.

2.1. Grado de avance

2.1.1. Destino de los módulos a proyectar

- Viviendas unifamiliares: con alto aprovechamiento del espacio reducido, que contemple los servicios mínimos como cocina, baño, sala de estar-comedor y dormitorio.
- Habitación temporal: Espacio de dormitorio compartido con baño.
- Sala de emergencias transportable: Unidad básica destinado a consultorio médico cumpliendo los estándares mínimos requeridos por los reglamentos.
- Aula escolar en zonas rurales de rápida realización: Cumpliendo los requisitos mínimos establecido por reglamentos para una capacidad de 20 alumnos.



2.1.2. Superficies a cubrir

Estarán en función del análisis obtenido para cada una de las soluciones brindadas en su respectiva problemática. La superficie final tendrá la virtud de saciar todas las necesidades al mismo tiempo ofreciendo los servicios requeridos en cada caso (sanitarios, pupitres, camilla, etc.) con las menores dimensiones posibles.

2.1.3. Estudio del sistema constructivo

Los diseños prototípicos se han basado en el método constructivo conocido como Platform-frame o Sistema de Entramado de Madera. Se basa en la utilización de una estructura de tablas de escuadrías pequeñas (p.e. 2,54 cm x 7,62 cm ó 5,08 cm x 10,16 cm) las cuales se unen mediante clavos o tornillos confeccionando entramados horizontales o verticales (en función de la ubicación en la estructura) logrando de este modo que el elemento trabaje en forma conjunta distribuyendo los esfuerzos de una manera menos concentrada y se sustituye el empleo de grandes vigas y columnas utilizadas en la construcción tradicional.

Como ventaja primordial de este sistema se encuentra la utilización de madera proveniente de bosques implantados y manejados sosteniblemente por el hombre, lo que frena la deforestación de bosques nativos y aumenta los sumideros de carbono colaborando a reducir la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, uno de los principales gases a tratar por el “Acuerdo de París” sobre el cambio climático.

También es de los materiales empleados en la construcción que menos energía demanda para su fabricación, siendo esto una ventaja primordial a la hora de hablar de construcciones sostenibles.

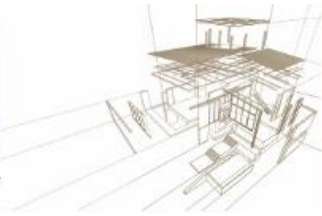
2.1.4. Diseño del prototipo

El sistema modular de paneles consistirá en el armado de tres “especies” de paneles que se realizarán en taller donde cada uno tendrá una función, características, modo de anclaje tanto intra-específico como inter-específico. En principio se planteó medidas estimativas según su peso para el montaje y atendiendo las especificaciones del sistema constructivo empleado.

Panel piso: Paneles de 1,20 m x 1,20 m ó 0,60 m x 1,20 m. Compuesto por barrera panel fenólico, listones 1,27 cm x 5,08 cm, lámina de polietileno, piso flotante. Todos estos elementos estarán unidos a una estructura conformada con escuadrías de 5,08 cm x 10,16 cm.

Panel muro: Paneles de 1,20 m x 2,44 m. Desde el interior hacia el exterior estarán compuestos por: Placa de yeso, lámina de polietileno, listones de 1,27 cm x 5,08 cm, lana de vidrio, barrera gas permeable, revestimiento exterior. Todos estos elementos estarán unidos a una estructura conformada con escuadrías de 5,08 cm x 10,16 cm.

Panel techo: Paneles de 0,60 m x Menor luz del ambiente. Su composición estará definida desde el interior hacia el exterior por placa de yeso, lamina de polietileno, listones de 1,27 cm x 5,08 cm, vigas de 5,08 cm x 15,24 cm, lana de vidrio, paneles fenólicos, barrera gas permeable, clavadera de 5,08 cm x 7,62 cm, aislante hidrófugo, chapa galvanizada.



La determinación de sus medidas está en función del ensamblado, para lo cual se tomó en base al peso y tamaño que pueden movilizar dos operarios. Las uniones entre paneles serán con fijaciones que permitan el desmantelamiento del módulo y su nuevo ensamblaje, impidiendo el desgaste de la estructura, aislación térmica eficiente, buena terminación estética y facilidad constructiva.

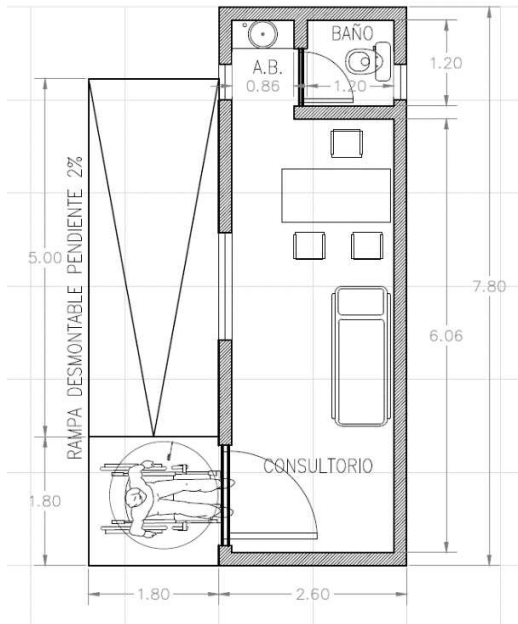


Figura 1: Módulo, sala primeros auxilios.

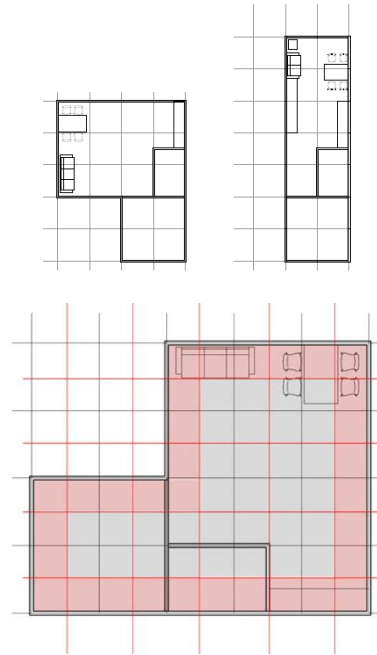


Figura 2: Módulos vivienda



Figura 3a: Módulo vivienda- Planta

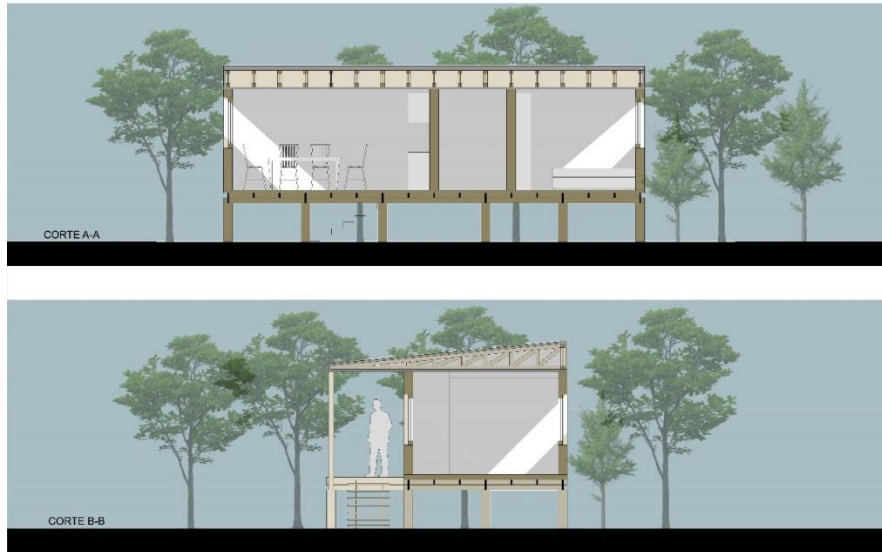
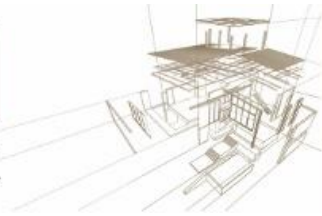


Figura 3b: Módulo vivienda- Cortes

2.1.5. Fundaciones

Para las fundaciones se dispondrá de varios artefactos transportables como se esquematiza en la Figura 4, los mismos estarán compuestos por una pirámide cuadrangular complementada por un vástago regulable que será de utilidad para la nivelación de la vivienda. Sobre estos irán una serie de vigas reticuladas de madera generando la unión de filas paralelas de las bases aisladas.

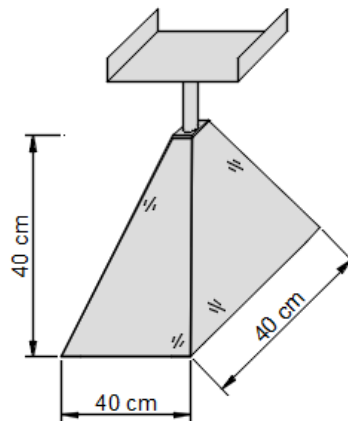
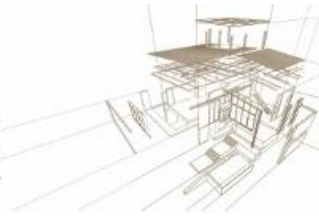


Figura 4: Base aislada transportable

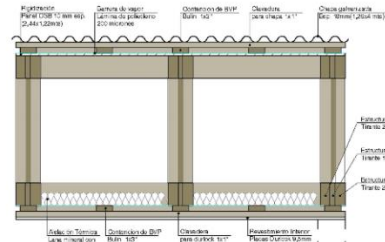
Por último se colocarán los paneles de piso que rigidizaran el conjunto de vigas dando mayor solidez al conjunto de fundación.



ZONIFICACIÓN POR USOS

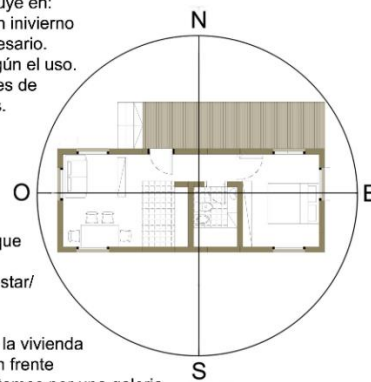


DETALLE CONSTRUCTIVO



ORIENTACIÓN

Una orientación adecuada contribuye en:
-Aprovechar ganancias de calor en invierno
-Control solar en verano si es necesario.
-Iluminación natural apropiada según el uso.
-Aprovechamiento de las corrientes de aire según vientos predominantes.



En este caso suponiendo una implantación en la provincia de Buenos Aires, proponemos esta orientación. Teniendo en cuenta que la habitación recibirá luz natural por la mañana, mientras que el estar/comedor recibirán iluminación por la tarde.
Los servicios se ubican al sur de la vivienda para generar una mayor aislación frente a los vientos de sudestada. Y optamos por una galería que genera control solar al norte,

Además la vivienda cuenta con ventilación cruzada que puede usarse de forma selectiva nocturna en casos de climas muy cálidos.

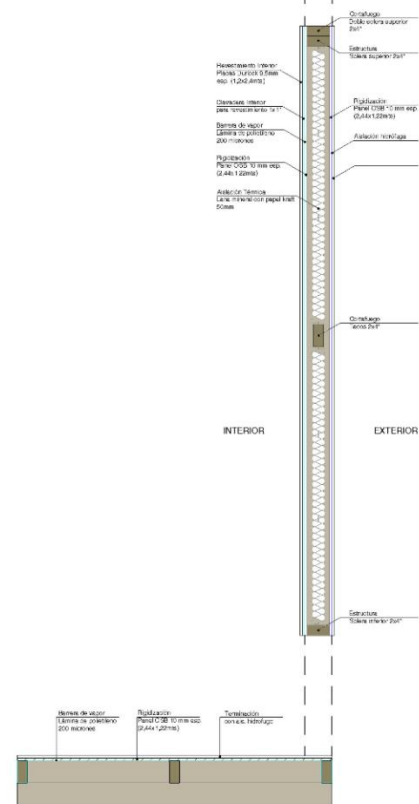
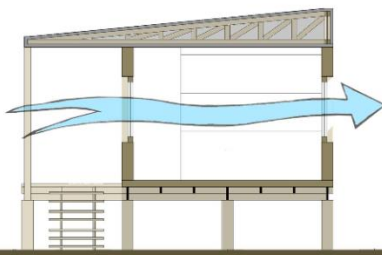


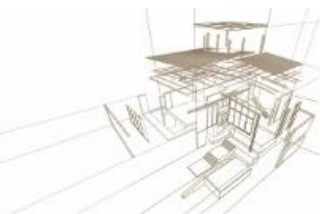
Figura 5: Funcionamiento vivienda unifamiliar y piezas partes de paneles

3. CONCLUSIONES

El presente trabajo demuestra el camino recorrido en las instancias iniciales para el proyecto y desarrollo de módulos habitacionales transportables construidos en madera.

Destacándose algunas conclusiones de los beneficios del empleo de la madera y del sistema constructivo como las siguientes:

- La construcción en seco y en particular el sistema constructivo Platform-frame, son adecuados para brindar soluciones a situaciones de emergencias que requieren una rápida acción por ser sistemas de ejecución veloz, que no requieren un terreno con alta capacidad de carga por ser livianos, y por ser desarmables no dejando rastros o huellas en el ambiente luego de su desmonte.



- Los sistemas constructivos en madera que están compuestos por paneles de varias capas y aislantes poseen menores coeficientes de conductividad térmica que otros sistemas constructivos tradicionales, de tal manera que logran resultados óptimos ante las inclemencias del tiempo.
- Por otro lado, se hace sumamente interesante emplear materiales como la madera ya que la misma proviene de bosques cultivados siendo una materia prima responsable, renovable y sostenible a largo plazo. Además, estos bosques implantados en su proceso de crecimiento por cada metro cúbico de madera, retiene una tonelada de dióxido de carbono y libera a razón de 0,7 toneladas de oxígeno a la atmósfera.

En un futuro próximo las tareas a realizar serán:

- Definir las medidas últimas a utilizar en las distintas “especies” de paneles cumpliendo, además de lo mencionado anteriormente, con la facilidad de ensamblado en serie y montaje en obra.
- Realizar ensayos mecánicos en la madera a emplear. Con ello se tendrán los valores de resistencias a insertar en un software de cálculo estructural y así definir la viabilidad de las medidas últimas adoptadas en el punto anterior para maderas que no se encuentren en el reglamento argentino de construcción en madera (CIRSOC 601)
- Definir uniones mecánicas y en base al punto anterior siguiendo la metodología de pruebas en un software, definir sus dimensiones y cantidad de fijaciones.

Por último se seguirá lo planificado en la metodología cumpliendo los objetivos planteados en el PID y mejorando la situación actual de las distintas problemáticas que aborda este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNIVERISDA TECNOLÓGICA NACIONAL, Facultad Regional La Plata y a su Departamento Ingeniería Civil por el apoyo brindado al trabajo del GIV; a todos los integrantes del GIV que han colaborado en la presente publicación y brindan su trabajo cotidiano en post del desarrollo grupal, y al Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD) de la facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP por el trabajo en conjunto que venimos desarrollando hace varios años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borghello, J. (2017). ¿Por qué no en madera? Exposición oral Expo UTN 2. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN FRLP). La Plata, Argentina.
- Cavedo, C. (2016). Infraestructura escolar 2016-2025. Buenos Aires: Cámara Argentina de la Construcción.
- Glanc, Mario (2015). Artículo periodístico “Salud enferma: la crisis de los hospitales públicos argentinos”. Buenos Aires: La Nación
- Kliksberg, B. (2011). Escándalos éticos. Buenos Aires: Temas Grupo Editorial SRL.
- Ramírez, M. C. (2016). “Inundaciones”. Buenos Aires: World Bank Group



UNIONES DINÁMICAS PARA SISTEMAS DE FÁCIL MONTAJE CON ELEMENTOS TUBULARES, BÓVEDAS Y CÚPULAS

DYNAMIC JOINT FOR EASY ASSEMBLY SYSTEMS WITH TUBULAR ELEMENTS, VAULT AND DOME

Coca, Sindy ⁽¹⁾*; Lozano, Jorge ⁽²⁾; Linares, Gabriel⁽³⁾

⁽¹⁾ Arquitecta/Magíster en Construcción. Facultad de artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽²⁾ Arquitecto/Magíster en Construcción/Especialista en patología de la edificación. Facultad de artes,
Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽³⁾ Ingeniero Mecánico/ Especialista en Gestión de Proyectos, Universidad Nacional de Colombia/ UNAD.
Bogotá, Colombia.

* Contacto: smcocan@unal.edu.co

Resumen

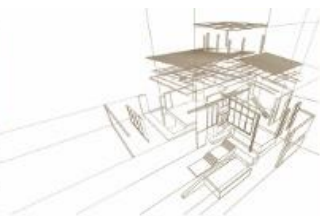
La investigación desarrolló el diseño de uniones dinámicas para un sistema estructural y constructivo en elementos tubulares (dentro de estos la posibilidad de usar madera rolliza y bambú). El sistema se basó en la morfología estructural de sistemas de superficie activa, más específicamente plegaduras antiprismáticas, convirtiendo el sistema de superficie activa a sistema de vector activo, con el fin de reemplazar los pliegues por elementos tubulares. Durante el proceso se realizó una búsqueda de sistemas y uniones similares, analizando las ventajas y desventajas de cada uno. Se propuso un diseño en donde se analizó la movilidad del sistema en general y de las uniones, utilizando para ello simulaciones por computador y modelos a escala. Obteniendo como resultado las uniones dinámicas que facilitan el proceso constructivo de todo el sistema y los valores dimensionales de la estructura relacionados con las dimensiones de los elementos tubulares, el sistema se puede pre-armar en el suelo y con fuerzas laterales lograr su configuración espacial final, él está conformado por elementos prefabricados.

Palabras-clave: Sistemas de superficie activa, Sistemas de vector activo, Conexiones dinámicas, Estructura plegable.

Abstract

The research development design to dynamic joints for a construction and structural system by tubular elements (in this possibilities are the wood and bamboo). The system based on the structural morphology of surface active systems, specifically folded antiprismatic surface, we converted the folds to tubular elements. In this process was made a search of similar systems and joints, analyzing the advantages and disadvantages of each. We proposed a design where the mobility of the system in general and of the unions was analyzed, from this we used a computer simulations, scale models. Got the results the dynamic joint that doing easy constructive process of the entire structure and we got dimensional values that related with the dimensions of tubular elements, The system can be assembled in the floor and lateral forces for give the finally spatial configuration. The systems have prefabricated elements.

Keywords: Surface active systems, Vector active systems, Dynamic connections, Foldable structure.



1. INTRODUCCIÓN

Se plantea diseñar un sistema constructivo con base en la morfología y geometría de algunos sistemas de superficie activa, específicamente plegaduras. La estructura debería ser dinámica, de fácil construcción y ser versátil en su uso y materiales. Permitiéndose ser usada como estructura temporal o permanente, está conformada por elementos tubulares y uniones dinámicas que se deberían realizar de forma prefabricada antes del montaje de la estructura.

Se tuvo como objetivo general en el proyecto desarrollar un sistema de uniones dinámicas para elementos tubulares basándose en la morfología estructural de las plegaduras prismáticas para aplicaciones estructurales - arquitectónicas.

2. METODOLOGÍA

Como metodología para cumplir el objetivo general se realizaron cronológicamente las siguientes actividades:

- Se analizaron los sistemas de superficie activa, vector activo, conceptos básicos del movimiento y proyectos pertinentes con el tema, para determinar conceptos y condiciones que se tuvieron en cuenta al momento de diseñar las uniones.
- Se analizaron y evaluaron las plegaduras y sus movimientos para determinar los requerimientos de las uniones y su aplicación arquitectónica.
- Se identificaron los movimientos en los distintos nudos y el funcionamiento cinemático general de la estructura mediante, maquetas y prototipos.
- Se diseñaron, modelaron y simulaban tridimensionalmente las uniones para determinar los ensambles de los elementos tubulares y los movimientos en los distintos nudos, y dependiendo del comportamiento en la simulación se realizaron ajustes en los diseños.
- Se realizaron prototipos a escala con las uniones diseñadas para la comprobación de la estabilidad y movilidad del sistema, en la comprobación de los prototipos se encontraron algunos inconvenientes y con base en ellos se hicieron ajustes a los modelos y diseños.

Finalmente se ajustaron las uniones dinámicas en el material final y con las dimensiones para la estructura prototipo 1:1 del cual se hicieron los planos, pero no se realizó.

El sistema constructivo actualmente se encuentra en proceso de Patente de invención.

2.1. Antecedentes

En la búsqueda de un sistema de fácil y rápida construcción surgió plantear el un sistema con uniones dinámicas que pudiera armarse en el suelo y luego con fuerzas laterales se pudiera izar, para esto tomamos como base los sistemas de superficie activa y se buscó transformar sus pliegues en elementos tubulares para convertirlo en un sistema de vector activo (Figura 1).

El sistema se diseñó adaptable a diversos factores arquitectónicos, técnicos y estructurales. El sistema puede ser usado como equipamientos culturales, deportivos, de



acopio, de salud, educativos, viviendas de emergencia ya sea en zonas rurales o urbanas. Beneficiando a diferentes comunidades que tengan dichas necesidades. Sus barras pueden ser en diferentes materiales tales como: madera rolliza, guadua, tubos de cartón metálicos tubulares.

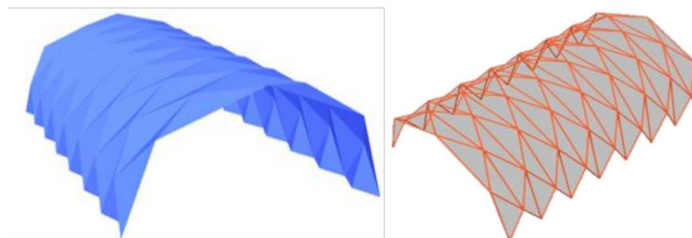


Figura 1: Bóveda hexagonal de 8 elementos por tramo en sistema de superficie activa (a la izquierda) y en sistema de vector activo (a la derecha).

2.2. Conceptos generales

En la revisión de proyectos previos se En el planteamiento del proyecto arquitectónico, se tomaron como base dos de los sistemas estructurales propuestos por Engel (2001) sistemas de vector activo y sistemas de superficie activa.

Los elementos cortos, la triangulación, los nudos articulados, la carga aplicada en los nudos, el uso de barras con trabajo estructural a compresión o tracción, es decir, elementos sometidos únicamente a esfuerzos axiales, son las principales características de los sistemas estructurales de vector activo.

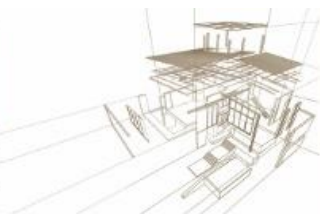
Mientras que, por su parte, los sistemas estructurales de superficie activa son presentan continuidad de superficie, conformación de tímpanos, rigidización de bordes, aumento de pliegues, intersección de superficies.

En esta propuesta, se plantea tomar como base la morfología de los sistemas estructurales de superficie activa, reemplazando los pliegues o aristas por barras que respondan a los esfuerzos de compresión y tracción, convirtiéndolos, así, en sistemas estructurales de vector activo que cumplen con las características del sistema, como se aprecia en la Figura 1.

En el proceso de revisión de prototipos e investigaciones con planteamientos similares, se destaca el desarrollo de un sistema de refugio móvil plegable en el que se diseñaron las uniones para facilitar su armado y responder a la movilidad del sistema (De Temmerman, 2006). Al analizar su diseño, se observó que se utilizan dos barras para reemplazar los pliegues verticales, para lo cual, con el fin de mejorar su desempeño y lograr una economía de material, se eliminó una de las barras por pliegue y se logró desarrollar una fórmula para calcular el ángulo de pliegue, el cual se tomó como base para hallar otros parámetros en el planteamiento de la estructura.

La unión desarrollada está compuesta por seis elementos unidos por medio de bisagras, los cuales tienen los ángulos necesarios para generar y mantener la forma, dependiendo de la estructura a construir.

Con respecto a los métodos de unión de las barras, se analizaron algunas uniones estáticas en sistemas tubulares, en los que se probaron diferentes soluciones de



ensamble por medio de pasadores, tornillos, soldadura, atornillando las barras o introduciéndose en ranuras. De donde se pudo establecer que el mecanismo más eficiente, por facilidad y funcionalidad, es el ensamble con tornillos y pasadores.

2.3. Sistemas de superficie activa

Los sistemas estructurales de superficie activa se subdividen en plegaduras y cáscaras. Las plegaduras son superficies continuas compuesta por pliegues rectos que otorgan la resistencia y rigidez al sistema estructural, a diferencia de las cáscaras, que son superficies curvas que pueden ser clásticas, sinclásticas o anticlásticas.

Para realizar el cambio de sistema estructural de superficie activa a sistema estructural de vector activo, los pliegues se reemplazan por barras, lo que hace necesario diseñar uniones que articulen y vinculen las barras entre sí para dar unidad, estabilidad y funcionamiento cinemático al sistema.

Así, para determinar los comportamientos y dimensionamientos de la estructura dinámica y sus diferentes elementos planteados, se debe tener en cuenta varios aspectos desarrollados a continuación.

2.3.1. Análisis geométrico

Hay dos características principales en el patrón de la geometría de las plegaduras: el trazado y el comportamiento de los pliegues (valles y montañas).

El trazado es el desarrollo de las plegaduras sobre una superficie horizontal. Las líneas que se trazan en dicha superficie son los pliegues que luego van a conformar la plegadura.

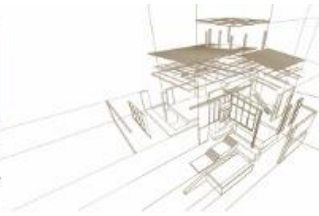
La mayoría de las plegaduras son desarrollables y los trazados varían dependiendo del tipo de plegadura. En la Tabla 1 se presentan los trazados de cada uno de los tipos de plegaduras y las principales características de los pliegues.

Al evaluar estos tipos de plegaduras, se puede ver que las plegaduras prismáticas y trapezoidales presentan caras con geometría de polígonos cuadrados y de trapecio, cuyas formas son deformables estructuralmente o necesitarían elementos adicionales para garantizar su estabilidad. Las plegaduras piramidales presentan caras trianguladas con pliegues muy extensos que, al momento de alternarse por una barra, esta sería demasiado larga y esbelta.

Por lo anterior, gracias a la forma triangular de todas sus caras, la corta longitud de sus pliegues y la estabilidad estructural debido a su disposición, las plegaduras antiprismáticas son la alternativa que cumple con las características de los sistemas estructurales de vector activo.

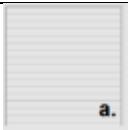
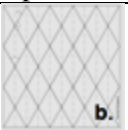

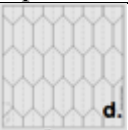
En las plegaduras antiprismáticas, el trazado está compuesto por un grupo de pliegues simétricos inclinados (pliegues diagonales) en las dos direcciones y por un grupo de pliegues verticales que pasan por las intersecciones de los pliegues diagonales.

Las plegaduras antiprismáticas reciben su nombre por el ángulo generado en el trazado y el polígono generado al cierre de la plegadura. De tal manera que, aquellas que tienen un ángulo de 90° , igual que en un cuadrado, recibirán el nombre de plegaduras








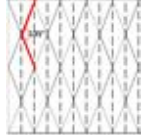



antiprismáticas cuadradas; aquellas que tienen en su trazado ángulos de 120° , el mismo ángulo interno del hexágono, se llaman plegaduras antiprismáticas hexagonales; y aquellas en cuyo trazado tienen un ángulo de 135° , el mismo ángulo interno del octágono, se nombran plegaduras antiprismáticas octogonales.

Tabla 1: Trazados de plegaduras

Prismáticas	Antiprismáticas	Piramidales	Trapezoidales
			
Pliegues paralelos y perpendiculares.	Pliegues en retículas y ángulos generados entre ellos.	Pliegues concéntricos.	Combinación de pliegues paralelos y retículas de pliegues de ángulos.

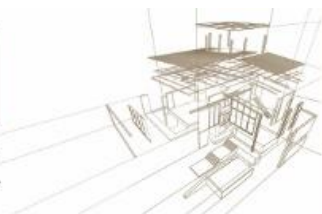
Este nombre también tiene relación con el polígono que se forma al plegarse totalmente la plegadura vista frontalmente, correspondiendo dichos polígonos a los anteriormente nombrados. Véase la Tabla 2.

Tabla 2: Geometría de trazados

	Cuadradas	Hexagonales	Octogonales
	Ángulo de 90°	Ángulo de 120°	Ángulo de 135°
Polígono			
Trazado			
Vista Frontal plegadura	 PLEGADO	 PLEGADO	 PLEGADO

2.3.2. Comportamiento de los pliegues

Al plegar la estructura se genera un módulo que, siguiendo el patrón Yoshimura, genera valles y montañas. Específicamente, en el trazado de las plegaduras antiprismáticas visto anteriormente, el grupo de pliegues inclinados se convierte en montañas y el grupo de pliegues verticales y horizontales se convierte en valles. Los pliegues se



reemplazarán por barras y las intersecciones por uniones al momento de cambiar el sistema de superficie activa al sistema de vector activo.

El número de elementos que se interceptan en las uniones es primordial al momento del diseño de la unión. Las bóvedas tienen un único tipo de intersección interna con seis elementos que llegan a ellas. Los remates son variaciones de la intersección interna. No varían sus ángulos ni el tipo de barra, lo único que varía es el número de elementos que llegan a ellas, debido a la finalización de la estructura, por lo cual, hay ausencia de algunos elementos. En la cúpula existen tres intersecciones internas diferentes. Una de ellas es crítica por el número de elementos que tiene, 12 en total, mientras las otras dos intersecciones tienen sólo seis elementos; la diferencia entre las dos consiste en el ángulo que se encuentra entre las barras. Al contrario de la bóveda, los remates no sólo varían en el número de elementos, sino también en su configuración. Por lo anterior, la plegadura antiprismática tipo bóveda es la ideal para realizar la conversión por tener un sólo tipo de intersección.

2.4. Análisis de movilidad

Para los análisis de movilidad se usaron simulaciones tridimensionales por computador en el software Rhinoceros (Figura 2) y solid Edge. Y se realizaron dos tipos de análisis uno en los nudos y otro de la estructura general.

2.4.1. Análisis de movimiento en el módulo

Las plegaduras antiprismáticas están compuestas por varios triángulos exactamente iguales. Se encontró que dentro de las plegaduras se agrupan dos de los triángulos conformando módulos que tienen un comportamiento de movimiento constante, siendo siempre los pliegues que se convierten en valles y los pliegues que se convierten en montañas los mismos. El módulo está compuesto por cuatro aristas cortas (montañas) y una larga (valle).

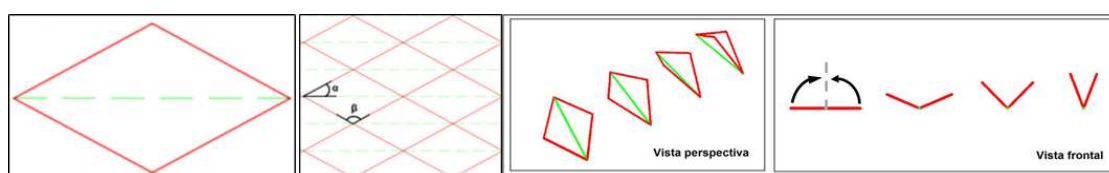


Figura 2: Módulo y Movimiento del módulo. En rojo pliegues de montaña y en verde pliegue de valle.

Se realizó un análisis desde del módulo de la plegadura (Figura 2). El módulo se encuentra compuesto por dos planos que rotan teniendo como eje la arista central (arista larga); los planos siempre conservan un ángulo de 30° entre el cateto representado con verde y los representados con rojo, siendo este el ángulo α ; y un ángulo de 120° entre los catetos representados en rojo, correspondiendo este al ángulo β . Ver Figura 2

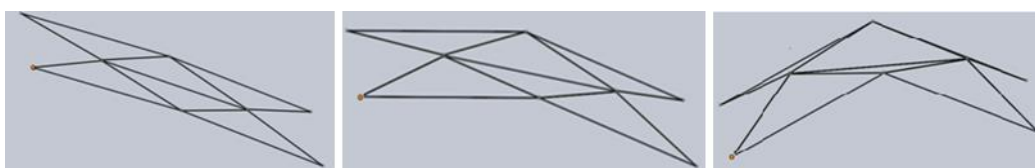


Figura 3: Comportamiento cinemático de varios módulos (en secuencia)

Luego se unieron varios módulos y se identificó que el movimiento se repetía en todos ellos (Figura 3), por lo que se concluyó que estos movimientos eran los que se tendrían en cuenta al momento del diseño.

2.4.2. Cinemática general del sistema

El sistema presenta tres posiciones principales. En la primera, todos los elementos se encuentran sobre un solo plano, asemejándose a una hoja de papel sin pliegues; esta se denominará con ángulo $\theta = 0^\circ$. La segunda presenta la mejor espacialidad y determina la forma de la estructura en bóveda; se denominará con ángulo θ ideal. Finalmente, la tercera es el plegado de la estructura formando un plano vertical cuyo grosor depende del número de elementos y su tamaño; esta se denominará con ángulo $\theta = 90^\circ$ (Figura 4).

Para efectos de la investigación se tuvo en cuenta el movimiento desde la posición con ángulo $\theta = 0^\circ$ hasta la posición con ángulo θ ideal, porque se consideró una buena opción para un acercamiento inicial sobre el tema.

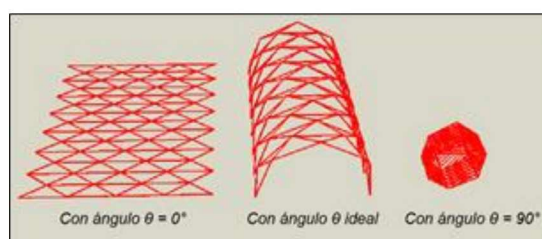


Figura 4: Posiciones principales del sistema

2.5. Diseño y modelado de uniones

Las uniones se diseñaron con el objetivo de ejecutar los movimientos vistos en el análisis del módulo y del sistema en general. Dicho diseño se realizó sin ninguna escala específica, ya que el objetivo del mismo era el de comprobar el funcionamiento cinemático de la unión, del módulo y de la estructura en general. Así mismo, se plantearon uniones metálicas sin especificar el metal a emplear.

A continuación se presentan los requerimientos y diseño de las uniones:

- Se deben mantener el ángulo α en 30° y el ángulo β en 120° . Estos no pueden variar, ya que los planos imaginarios se deben conservar de las mismas dimensiones.
- La rotación de los planos tiene como eje de rotación la barra larga y debe permitir llegar al ángulo de pliegue ideal, el cual, para la bóveda hexagonal de ocho elementos por sección, es de $67,07^\circ$.

Se diseñó una unión que cumplía con los requerimientos anteriores y que inicialmente se usaría en todos los nudos de la estructura. (Figura 5)

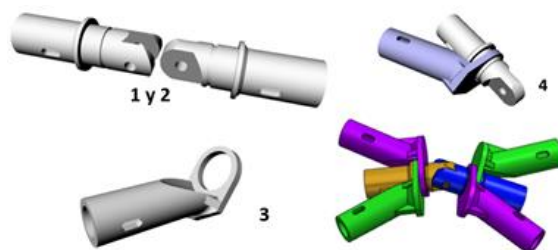
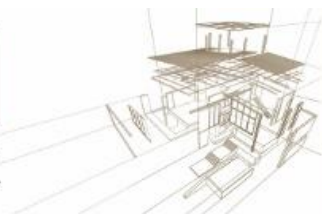


Figura 5: Diseño primera unión basada en el análisis de movimiento del módulo

La unión está compuesta por dos piezas (1 y 2) machihembradas, unidas por un pasador. Estas permiten la rotación entre módulo y módulo, y a ellas van unidas las barras largas.

Luego de esto se necesitó cumplir con la rotación de las barras cortas alrededor de las largas y manteniendo el ángulo de 30° . Por eso se diseñó una pieza (3) que, por medio de un agujero, se introduce en las primeras piezas y permite el giro manteniendo el ángulo α en 30° (4). Todas las piezas son tubulares y tienen agujeros para permitir el anclaje de las barras.

Ya resuelto el movimiento con la primera unión, se simuló la totalidad de la estructura, encontrando que este tipo de unión no era suficiente para todas las intersecciones, pues en el momento de hacer el movimiento total de la estructura, dichas uniones no se movía adecuadamente, ya que, aunque en planta se vieran exactamente iguales, al verlas tridimensionalmente se diferenciaban por su ubicación espacial dentro de la morfología de la estructura, es decir, unas se encuentran más arriba (en verde) que las otras. Funcionando las primeras uniones muy bien para los nodos que se encuentran en la parte más baja (en amarillo). (Figura 6) Por lo cual se procedió a diseñar las uniones de elevación.

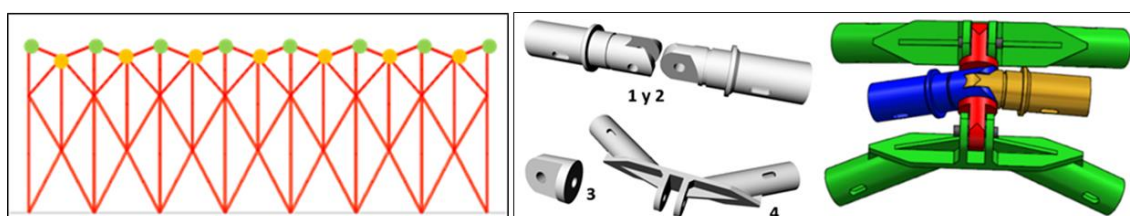


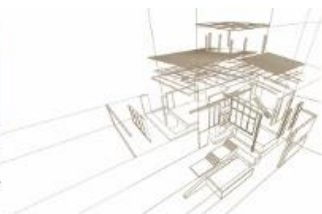
Figura 6: Vista lateral de ubicación de uniones en estructura (Izq.) Uniones de elevación (Der.)

En el diseño de la unión de elevación se utilizaron las mismas piezas macho y hembra de la primera unión, pero en lugar de estar unidas por un pasador, se unieron por medio de un espárrago, en el que se enrosca posteriormente la pieza 3.

Posteriormente se une la pieza número 4 que garantiza el ángulo β de 120° , permitiendo la rotación de elevación al unirse al resto de la unión. (Figura 6)

Las uniones se diseñaron utilizando la menor cantidad de piezas posibles y se usaron piezas conjuntas en ambas uniones. Además de las piezas, las uniones están compuestas por accesorios como: pasadores, segger, espárragos y, adicionalmente, tornillos para unir las barras a ellas.

2.6. Modelos de comprobación



Para la comprobación del diseño se decidió hacer un prototipo escala 1:3, fabricando las piezas de las uniones con impresora 3D en plástico PLA. Las uniones fueron fabricadas como piezas individuales, provistas de los agujeros necesarios para su posterior ensamble. Luego de fabricadas, las piezas individuales se ensamblaron con las barras de madera siguiendo los planos obtenidos en el diseño y utilizando pasadores de cobre, seeger de acero y tornillos. Luego se realizó el montaje del módulo con una unión de elevación y cuatro remates de la unión inicial, comprobando la movilidad adecuada del módulo y el buen comportamiento cinemático de las uniones. Figura 7 (Izq.)



Figura 7: Prototipo de módulo ensamblado (izq.) y Montaje 1 prototipo escala 1:3. (Der.)

Se realizó un primer montaje de dos tramos de la estructura, realizando el movimiento de las uniones hasta plegarla estructura adecuadamente. Se encontró una deficiencia estructural en las uniones del prototipo debido al proceso de fabricación de las piezas, haciendo que se rompieran fácilmente, perdiendo así la estabilidad de la estructura. En la Figura 7 (Der.) se presentan las imágenes del primer montaje.

Se necesitó hacer un tratamiento de endurecimiento a las piezas y, luego de este, se procedió a realizar un nuevo montaje, en cual se usó una base metálica para anclar la estructura. La Figura 9 muestra el último montaje del prototipo escala 1:3.



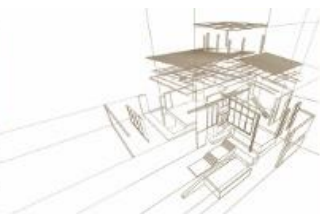
Figura 9: Montaje prototipo escala 1:3. Montaje 2.

2.7. Ajustes a escala 1:1

Con lo encontrado en el prototipo escala 1:3, se realizaron ajustes en cuanto a la movilidad del sistema, directamente en las uniones, creando algunos topes que evitaran movimientos innecesarios y permitieran únicamente los movimientos necesarios para el pliegue de la estructura hasta el ángulo θ ideal.

Debido a la diferencia de material y proceso de fabricación, entre el prototipo y la estructura final se hicieron ajustes de medidas y componentes de las uniones. El material propuesto para las uniones finales fue acero al carbón. La Figura 30 presenta los modelos de las uniones con las modificaciones. Además de los topes que restringen algunos movimientos, se cambiaron los seeger por tuercas que impide que las piezas hembras se salgan.

3. CONCLUSIONES



Después del análisis de movilidad en nudo y módulo, se concluyó que el diseño de las uniones se debería realizar con base al movimiento de los módulos, ya que es consecuente con la cinemática general del sistema. Y las uniones cumplieron con los siguientes requisitos:

- Se deben mantener el ángulo α en 30° y el ángulo β en 120° . Estos no pueden variar, ya que los planos imaginarios se deben conservar de las mismas dimensiones.
- La rotación de los planos tiene como eje de rotación la barra larga y debe permitir llegar al ángulo de pliegue ideal, que, para este caso de la bóveda hexagonal de ocho elementos por sección, es de: $67,07^\circ$.

Al diseñar las uniones se utilizó la mínima cantidad de piezas diferentes. Aunque entre la unión normal y la unión de elevación se realizaron diferentes configuraciones y se necesitó usar algunas piezas diferentes.

En el análisis cinemático de la estructura se concluyó que el sistema presenta tres posiciones principales: plan o con ángulo $\theta=0^\circ$, plegada con ángulo θ ideal y plegada totalmente o ángulo $\theta=90^\circ$.

Al realizar la conversión de una plegadura a un sistema de vector activo se cumplieron las principales características de este: elementos cortos, triangulación, nudos articulados, carga aplicada en los nudos y barras a compresión o tracción.

Los prototipos a escala, la simulación y modelos por computador permitieron comprobar la movilidad de las uniones y de la estructura en general. Al realizar el montaje del prototipo escala 1:3, se comprobó la simplificación del proceso constructivo, contrastado con la complejidad del sistema constructivo de los sistemas de superficie activa. La estructura a futuro podría realizar un gran impacto social, por su facilidad de construcción. Además los costos y tiempos de ejecución son más bajos la prefabricación de la mayoría de los elementos de la estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

De Temmerman, N., Mollaert, M., and Van Mele (2006) Development of a foldable mobile shelter system, in International conference on adaptable building structures eindhoven the Netherlands, Netherlands, p.5

Engel, H. (2001) Sistemas de estructuras, primera edición. Gustavo Gili, Barcelona, España.

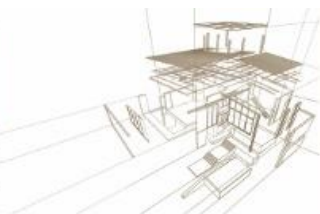
Jackson, P. (2011) Técnicas de plegado para diseñadores y arquitecto, Promopress. Barcelona, España.

Mariño, R. (2004). La geometría en el arte y el diseño. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Saldadori, M.G. and Baron, M.L. (1961). Numerical Methods in Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

Schumacher, M., Schaeffer, O., & Vogt, M. (2010). Move. Hannover, Alemania

Villate, M. C. (2008). Estructuras no convencionales en arquitectura. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia



APLICACIÓN DEL DISEÑO PARAMÉTRICO EN EL DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA EN BAMBÚ: GALERÍA DE PASSIFLORAS

APPLICATION OF THE PARAMETRIC DESIGN IN THE DEVELOPMENT OF A BAMBOO STRUCTURE: PASSIFLORAS GALLERY

Guerrero, Héctor^{(1) *}; Coca, Sindy⁽²⁾; Montaña, Jan⁽³⁾; Parada, Catherine⁽³⁾; Suárez, Alejandra⁽³⁾

⁽¹⁾ Mag. Arq. Universidad Nacional de Colombia/Universidad de los Andes .Bogotá, Colombia

⁽²⁾ Mag. Arq. Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽³⁾ Estudiante. Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

* Contacto: hguerrero@gmail.com

Resumen

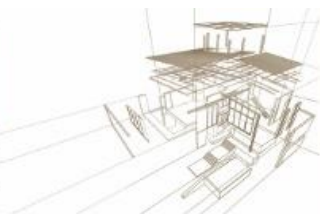
El diseño paramétrico es una técnica de diseño en la que se relacionan variables y parámetros para configurar el proceso que da como resultado un objeto proyectado; en esta investigación se busca aplicar este método por medio del software Grasshopper para diseñar una galería -ubicada en el edificio de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá- que permitirá analizar las relaciones entre las plantas passifloras y sus polinizadores. Adicionalmente, posibilita la exploración del uso del *Bambusa vulgaris* en la construcción. El proyecto se desarrolla en 4 fases: Implantación del proyecto, exploración formal del diseño arquitectónico, definición del proyecto arquitectónico y constructivo, y construcción de un módulo del proyecto. En la primera fase se establecieron los factores tangibles e intangibles que influyeron en la implantación de la galería, a cada uno se le asignó un valor numérico con el cual se realizó la parametrización de los ejes que relacionan el proyecto con el contexto. Posteriormente, a partir de los ejes obtenidos, en la segunda fase se desarrollaron 5 propuestas de aproximación formal; de las cuales se escogió la opción que mejor respondía a los requerimientos. Finalmente, con la propuesta resultante, se llevó a cabo la tercera y cuarta fase realizando los ajustes pertinentes mediante el mismo software.

Palabras clave: Diseño paramétrico, Grasshopper, Construcción en Guadua.

Abstract

Parametric design is a technique for designing in which variables and parameters are related to configure the process that results in a projected object; this research seeks to apply this method to design a gallery – located in the Biology’s building for the National University of Colombia, Bogotá- which will allow analyzing the relationships between passiflora plants and its pollinators. Additionally, the gallery permits the exploration of the use of *Bambusa vulgaris* for construction. The project is developed in 4 phases: Implantation of the project, formal exploration of the architectural design, definition of the architectural and constructive project, and construction of a module of the project. In the first phase, were established the tangible and intangible factors that had an influence in the implantation of the gallery; to each of them were assigned a numerical value with which was made the parametrization of the axes that relate the project with the context. Subsequently, from the obtained axes, in the second phase 5 proposals of formal approach were developed; among these, was chosen the option that best responded to the requirements. Finally, with the resulting proposal, the third and fourth phases were carried out, making the relevant adjustments during the process using the same software.

Keywords: Parametric design, Grasshopper, Bamboo construction.



1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Biología de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia se ha propuesto retomar parte de los diseños originales que Leopoldo Rother planteó para el sector que ocupan actualmente. Para lograr este fin, requieren del diseño de una galería que permita organizar el Jardín de interacciones planta-animal que tienen proyectado para el área colindante a su edificio. Esta estructura es diseñada, con ayuda de Grasshopper -una herramienta para la aplicación de diseño paramétrico-, con el fin de integrar esta metodología de trabajo y aplicarla a estructuras en Bambú usando la especie de *Bambusa vulgaris*, explorando formas alternativas de emplear este material en la construcción de un módulo que se repite para conformar una estructura a manera de pérgola para la cual se diseñan tres propuestas; adicionalmente se presentan dos configuraciones para un módulo central que articula los ejes de circulación del proyecto.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del Jardín de interacciones planta-animal primero se consultaron los diseños de Rother y la zonificación que se maneja en la ciudad universitaria. Al mismo tiempo, se indaga acerca del diseño paramétrico que posteriormente fue aplicado en una propuesta general de implantación; finalmente se desarrollaron las propuestas de diseño para la galería de passifloras.

2.1. Propuesta de Rother

La idea de construir una pérgola proviene de recuperar las ideas planteadas, desde 1936 por el botánico Enrique Pérez Arbeláez, de crear espacios para la investigación para los que Rother diseñó una propuesta en 1950 (Fig 1). En este se evidencia “la proyección de un Jardín Botánico, que incluye un gran invernadero tropical, pérgolas para plantas trepadoras de distintas especies (No. 3. en la Fig 1): *Palmetum*, *Criptogamium*, *coníferas*, *plantas acuáticas*, *roquedal*, *rosaleda*, etc; además de pabellones adicionales de investigación, invernaderos y zonas de cultivo a cielo abierto”. (Marquínez, 2017, p.33).

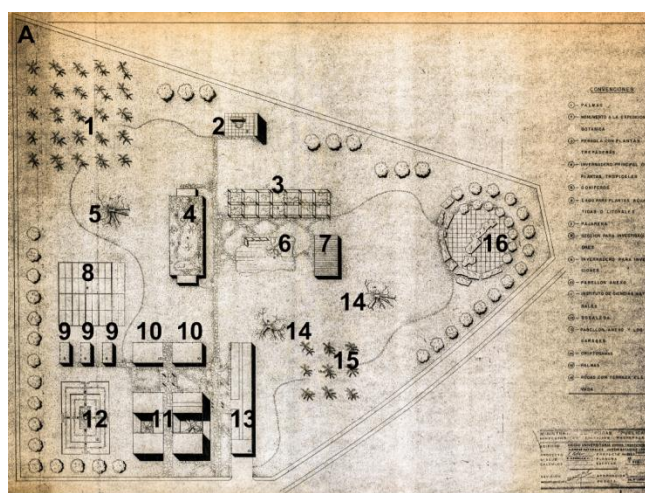
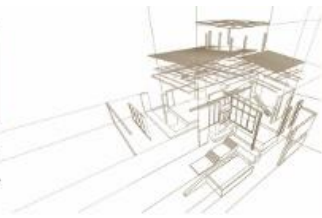


Figura 1: Plano de la propuesta del conjunto, Leopoldo Rother, 1950



Este jardín se plantea en el área en el que actualmente se encuentra el edificio de Biología del campus de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. La propuesta se organiza en módulos a manera de rejilla de diferentes tamaños configurados por elementos construidos y naturales. Con base a este plano y a los que detallan el diseño del edificio principal (Fig 2), se puede inferir que el acceso principal está dado por la parte sur del sector -ubicado en la parte inferior del plano- de igual manera que ocurre en la actualidad; y se comunica vehicularmente con el resto de la universidad por el camino que deriva del anillo vial.

En el conjunto se ubican como elementos naturales: agrupaciones de palmas (1 y 15), coníferos (5), lago para plantas acuáticas o litorales (6), rosalada (12), criptógamas (14) y rocas con terraza elevada (16). Para completar el conjunto, los elementos construidos son: monumento a la expedición botánica (2), pérgola con plantas trepadoras (3), invernadero principal (4), pajarera (7), sección para investigaciones (8), invernadero para investigaciones (9), pabellones anexos (10 y 13) y el Instituto de ciencias naturales (11).

De manera intencionada o no, en la actualidad el espacio construido comparte algunas similitudes con los diseños de Rother; además del edificio principal -que, como se mencionó anteriormente, corresponde al departamento de Biología- se ha hecho un esfuerzo por construir espacios para investigaciones como los invernaderos y el lago artificial que se encuentra en el sector. Si bien las plantas existentes no son de especies similares a las pensadas por Rother, se encuentran varios ejemplares de árboles y passifloras -junto con un ecosistema completo- que permiten adelantar las actividades investigativas y académicas de la Facultad.

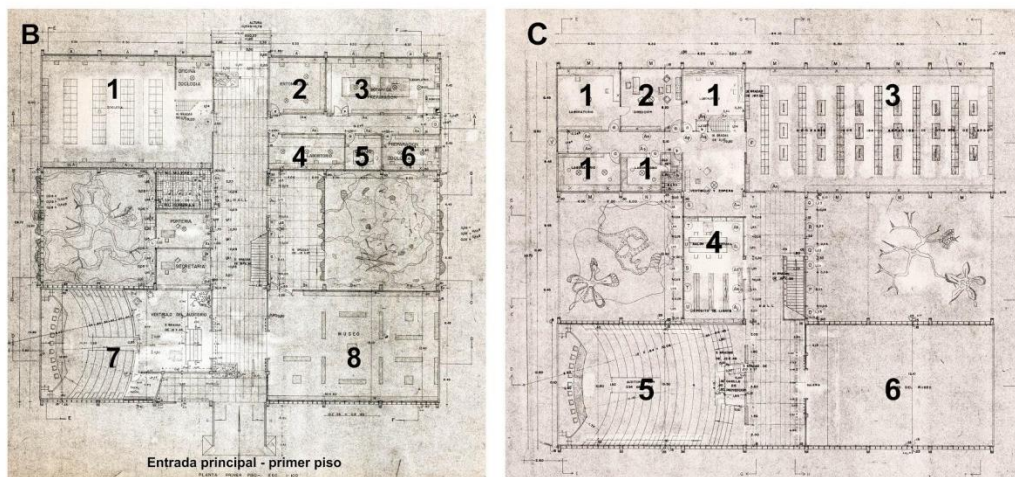
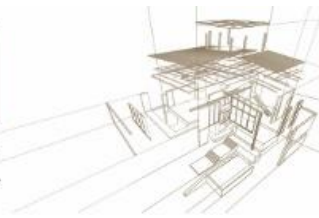


Figura 2: Plano de la propuesta para el edificio principal, Leopoldo Rother, 1950

2.2. Diseño paramétrico

Para continuar el aporte a la construcción de elementos que faciliten la investigación de las interacciones planta-animal, se utiliza como herramienta el diseño paramétrico para proponer la galería (que hace las veces de pérgola del diseño de Rother). El diseño paramétrico es un recurso de diseño en el cual, a partir de las relaciones entre las partes,



se construye una red de parámetros que modifican el objeto proyectual dependiendo de la evaluación y selección de los resultados obtenidos o de los criterios estéticos y funcionales requeridos (Navarrete, 2014). La implementación de esta metodología en el proceso de diseño permite la exploración integral de nuevas posibilidades estéticas condicionadas por aspectos variables, de acuerdo a los parámetros establecidos por el diseñador.

Según García y Lyon el diseño paramétrico se puede implementar al proyecto arquitectónico en tres etapas: a) en la definición de la forma a través de procesos generativos (dependientes de los antecedentes); b) para conciliar aspectos formales según criterios específicos; c) en una post racionalización en la que se refinan características formales de elementos específicos ya definidos en términos generales.

Una de las ventajas que conlleva la utilización de esta herramienta, es que facilita la participación de diferentes disciplinas, lo que abre la posibilidad a que converjan al mismo tiempo los requerimientos técnicos y estéticos, estableciendo una generación flexible y colectiva tanto del proceso de diseño como de ejecución (Roa 2014) ; esto implica una actitud diferente del arquitecto con relación al proyecto, la tarea creativa se entiende como un proceso conjunto en el que el equipo de trabajo se comunica por medio de diversos sistemas digitales empleados (García y Lyon 2013).

Para este caso se utiliza Grasshopper, un plug-in del programa Rhinoceros que permite plasmar el proceso proyectual por medio de un lenguaje similar a la programación de un objeto o programa. En este se pueden establecer parámetros modificables fácilmente que condicionan la apariencia visual del objeto proyectado. Permitiendo geometrías complejas, orgánicas y/o no convencionales, una de las características solicitadas por el equipo de biología.

2.3. Implantación

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se escogió el área adjunta al edificio de Biología de la Sede Bogotá; en el proceso se realizaron varias visitas al lugar con el fin de hacer una caracterización y levantamiento del sector, de igual manera se observaron los principales flujos que determinaron los ejes del proyecto. Con la información recolectada, se fijaron dos ejes principales (en rojo en la Fig 3) a partir de los principales recorridos de personas en el lugar: el primero fue la conexión de una salida lateral del edificio, en donde se encuentra la bodega de herramientas y un semillero, con el espacio de las huertas; el segundo, un camino peatonal paralelo al edificio por donde ingresa la maquinaria que hace el mantenimiento al lago. Posteriormente se definieron tres ejes restantes (en azul en la Fig 3) entre los espacios de siembra; adicional a los cinco ejes, también se estableció un punto central (en Naranja en la Fig 3) que surge de la intersección del eje proveniente del acceso al edificio con dos ejes complementarios.

Se prosiguió determinando los factores tangibles e intangibles que afectarían el funcionamiento del proyecto, a cada uno se les asignó un valor numérico -en un rango de -10 a 10- que cuantificaba su influencia en la modificación del paso de los ejes anteriormente demarcados (Fig 3). Dentro de los aspectos tangibles se definieron los ya existentes: Jardín de siembra permanente (8), Jardín experimental semestral (10), Jardín de proyectos a mediano plazo (8), Jardín de Hongos (8), además de la cafetería (7), el

lago (-1), la bodega de herramientas(5), la subestación eléctrica (0), la salida lateral del edificio de Biología (8), el sendero peatonal (6) y el edificio de residuos químicos (-4). Dentro de los valores intangibles se definió principalmente un requerimiento de altura de la galería, ya que debía ser una estructura en armonía con el paisaje y que a su vez tuviera relación visual con la cafetería.



Figura 3: Plano de ejes y atractores.

Finalmente, a partir de los valores numéricos se realizó la parametrización de los ejes - usando atractores que hacían que los ejes se modificarán acercándose o alejándose de a los diferentes puntos dependiendo del valor numérico dado previamente-, que relacionan el proyecto con el contexto (Fig 4), y sobre los cuales se dispondrá la galería a manera de recorrido y en el punto central un elemento como nodo articulador de los recorridos.

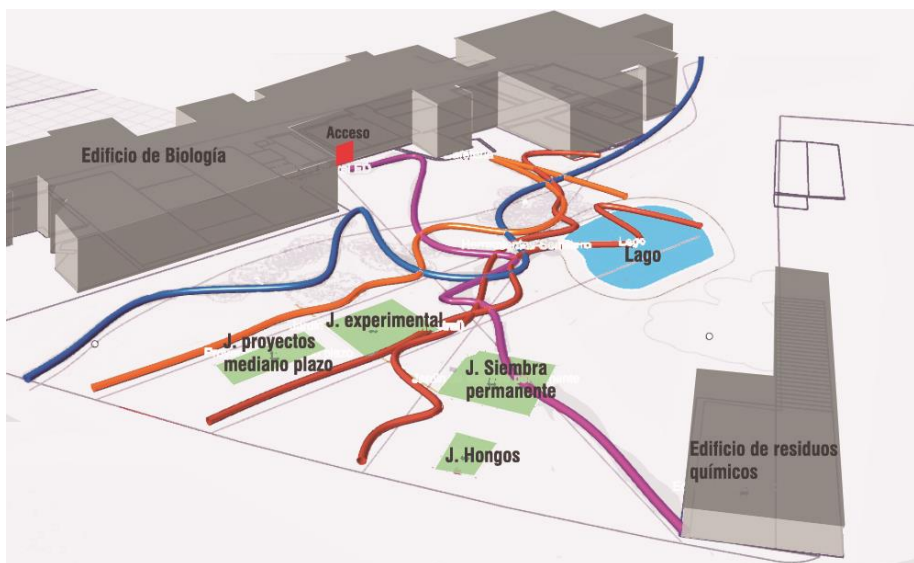
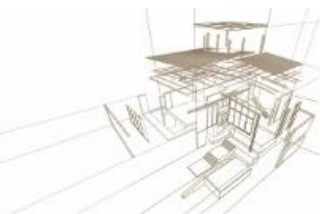


Figura 4: Modificación de ejes en relación a los atractores.



2.4. *Bambusa vulgaris*

La *Bambusa vulgaris*, conocida como bambú común, como su nombre lo indica es un tipo de bambú cultivado favorablemente en los trópicos húmedos presentes ampliamente en varias zonas de Colombia, pues su crecimiento se presenta de mejor manera en suelos húmedos, arcillosos densos o cualquier tipo de suelo que retenga la mayor cantidad de humedad posible pero al mismo tiempo se puedan drenar o tengan períodos de inundación cortos (Francis, 1993 p. 73). La lignina presente en los tejidos del bambú se convierte en una estructura liviana y flexible pero dura, de manera semejante a los tejidos de la madera, por lo que es resistente a los esfuerzos de flexión, tensión y compresión (Lucila Aguilar Arquitectos, 2018).

Esta planta llega a medir entre 10 y 20 metros, alcanzando diámetros que oscilan entre los 4 y 13 centímetros (Francis, 1993 p. 75); a pesar de que su crecimiento en altura puede tardar alrededor de 3 meses, adquieren la resistencia apta para la construcción pasados los 4 años (Lucila Aguilar Arquitectos, 2018).

3. PROPUESTAS

Para el diseño de la galería para el proyecto “Jardín de interacciones planta-animal” se generaron 5 propuestas bajo la aplicación de diseño paramétrico. Se tuvo como restricciones el largo de los elementos de bambú de 3 a 4 metros (por el tema del transporte) y como parámetro uno de los parámetros su grosor. En estas se exploran las diferentes posibilidades de configuración formal con el bambú, utilizándolo en su forma natural como recta o modificándolo para lograr varios tipos de curvatura; estas operaciones se emplean en las siguientes propuestas de diseño, para los recorridos: estructura helicoidal, estructura a partir de paraboloides y ala y para el elemento articulador: central de arcos y tejido.

a. Estructura helicoidal

Esta propuesta, para recorrido, se basó en la estructura de la cadena de ADN, a partir de dos ejes directrices: el primero una hélice y el segundo, una curva a nivel de suelo, los dos ejes se conectan mediante elementos rectos en *bambusa vulgaris* que se disponen para que las plantas puedan trepar y con el fin de dar estabilidad a la estructura.

En cuanto a espacios relacionados a la función de la pérgola se plantea que las zonas altas de la estructura son para recolectar muestras y para actividades relacionadas con investigación, las zonas bajas para estar, observar y mantenimiento y espacios a manera de umbrales de paso para atravesar la estructura (Fig 5).

Las variables que se establecieron para la propuesta fueron la cantidad de giros de la hélice, radio de giro, espesor de la guadua, cantidad de elementos rectos y espacio de los umbrales de paso.

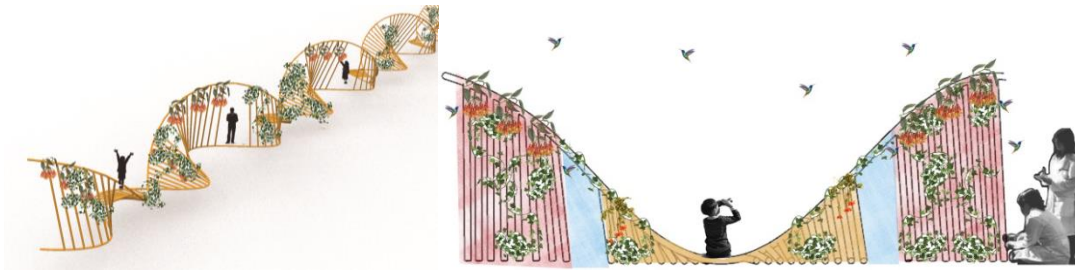


Figura 5: Propuesta helicoidal.

b. Estructura a partir de paraboloides



Figura 6: Propuesta con paraboloides.

Para esta propuesta (Fig 6) se consideró la estructura recta que presenta la bambusa vulgaris y se utilizó el paraboloide, una posibilidad geométrica de generar curvas visualmente a partir de una sucesión de rectas que se mueven en el espacio siguiendo dos trayectorias en cada uno de sus extremos. La estructura hace las veces de cubierta y está elevada por apoyos que conforman estructuras triangulares que dan mayor estabilidad al conjunto.

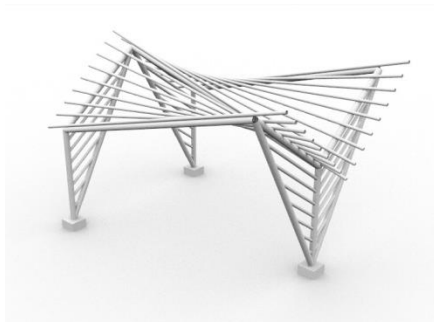


Figura 7: Módulo propuesta con paraboloides.

Por requerimientos de diseño y construcción, se diseñó un módulo (Fig 7) susceptible de repetirse las veces que sea necesario hasta completar el recorrido. Los parámetros modificables son: el ancho del módulo, la altura de la cubierta con respecto al suelo, la altura del paraboloide, el número de viguetas del paraboloide, el ancho de los aleros del paraboloide, la separación entre apoyos y el diámetro de los elementos.

c. Ala

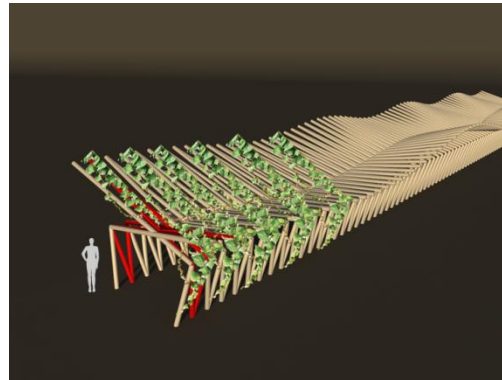
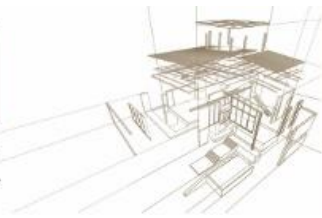


Figura 8: Propuesta Ala

Esta propuesta (Fig 8) se enfocó en el trayecto, utilizando dos estructuras trianguladas, cada una a un costado del eje, apoyándose entre sí generan un arco en forma de pentágono irregular y dos cubiertas sobresalientes en cada costado. La repetición de este módulo genera el recorrido, donde cada iteración modifica la altura de la cubierta sobresaliente. La modificación está basada en el aleteo de los colibríes buscando generar distintas ondulaciones para el análisis de las trepadoras.

Los variables de diseño son: ancho de la galería, altura quiebre de la estructura, ancho del módulo, la función del aleteo de la cubierta, diferencia entre la cubierta y la galería.

d. Central de arcos

Esta propuesta (Fig 9) está pensada para el módulo central en el que se interceptan los ejes del proyecto. Se construye a través de la curvatura de la *Bambusa* en arcos que se unen en dos círculos: uno exterior y el otro interior. En medio de estos se plantea la circulación que permite cambiar de eje en el recorrido. En el centro se generan espacios al aire libre para dictar clases o dar generalidades acerca de las instrucciones en el proceso de investigación, como fue requerido.

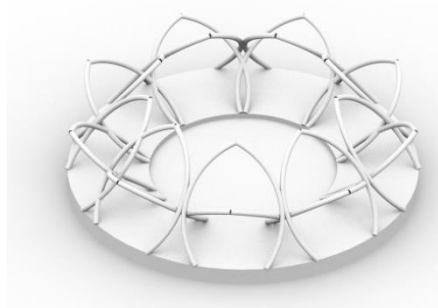
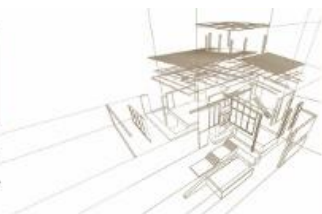


Figura 9: Propuesta central de arcos.

Los parámetros modificables son el radio de las circunferencias, la cantidad de divisiones de cada circunferencia -divisiones que conformarán los arcos- y el espesor del bambú.



e. Tejido

Esta propuesta está pensada para el punto central en la intersección de los ejes; Su exploración arranca inspirada la forma de un árbol y de algunas estructuras laminares tipo sombrilla, inicialmente con elementos curvos (**izq, Fig 10**) que se unían por medio de tres anillos (inferior, medio y superior), pero por facilidades constructivas se migró a una propuesta con elementos rectos (**der, Fig 10**), basada en la geometría de un hiperboloide de revolución. Esta está compuesta de dos circunferencias: una superior y otra inferior y entre las circunferencias elementos rectos. Como parámetros modificables tiene: tamaño círculo superior, tamaño círculo inferior, altura y número de elementos.

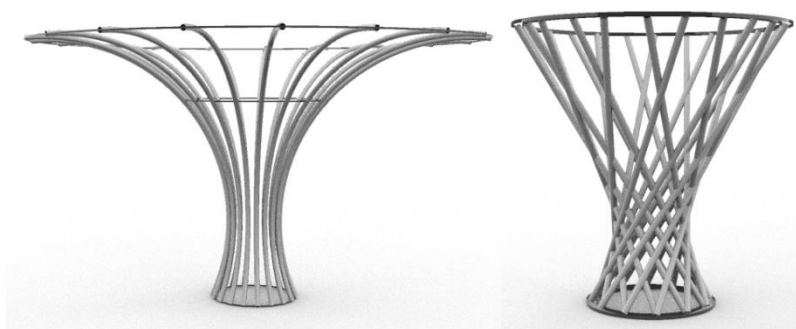


Figura 10: Propuesta central de Tejido.

4. CONCLUSIONES

El diseño paramétrico como herramienta proyectual permite la exploración formal de los proyectos a partir de parámetros establecidos, (técnicos, arquitectónicos, estructurales). También se utilizan las herramientas adicionales que facilitan la construcción de las estructuras; el software genera el cálculo de las piezas necesarias para la materialización y ensamblaje del objeto diseñado a partir de las dimensiones del bambú.

La exploración permitió obtener propuestas arquitectónicas y estructurales poco convencionales para las construcciones en Bambú, con geometrías complejas. La construcción del prototipo se encuentra pendiente debido a que se encuentra en trámite los recursos económicos para su ejecución.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en colaboración con el Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y en el marco del Grupo de Investigación de Madera y Guadua de la misma institución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Francis, J (1993). *Bambusa vulgaris* Schrad ex Wendl. Common bamboo. SO-ITF-SM65. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.



García, R.; Lyon, A. (2013). Diseño paramétrico en Arquitectura. *ARQUISUR Revista*, 3(3), 20-31.

Lucila Aguilar Arquitectos (2018). *Manual de construcción con Bambú*.

Marquínez, X.(2017). La Naturaleza como laboratorio: La influencia Alemana en las ciencias biológicas.

Navarrete, S. (2014). Diseño paramétrico: El gran desafío del siglo XXI. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, (49), 63-72.

Roar,R. (2014).El diseño paramétrico aplicado a las soluciones y detalles constructivos.

Romero Méndez, M., Rodríguez Ortiz, J., Lara Compeán, I., Betancourt Urbina, M., Alcalá Jáuregui, J., Villarreal Guerrero, F., & Cárdenas Martínez, A. (2017). Prototipo de invernadero con estructura de bambú: selección de materiales, diseño e impacto ambiental. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1059-1072.

Valero, S. W., Reyes, E., Contreras, W (2005). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del Bambú (*Bambusa vulgaris*), de tres años de edad y proveniente de las plantaciones ubicadas en la ribera de la margen derecha del Río Chama, municipio Francisco Javier Pulgar, Estado Zulia, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, (37) 87+.



LA MADERA LAMINADA APERNADA, CUBIERTA DE LA BASÍLICA DE PÁTZCUARO, MICHOACÁN. MÉXICO.

THE LAMINATED WOOD BOLTED, THE BASILICA'S ROOFING OF PÁTZCUARO, MICHOACÁN. MÉXICO.

Navarrete Padilla René

⁽¹⁾Dr. Arq. Departamento de Arquitectura, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

* Contacto: rene@ugto.mx

Resumen

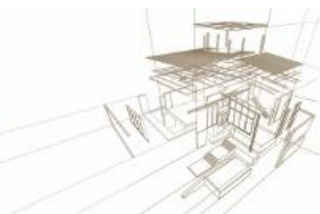
Introducción: Si concebimos en su comportamiento a la madera laminada como una sola unidad, basándonos en la unión que garantizan los pegamentos utilizados hoy en día, el análisis de una estructura laminada sin pegamento sino a través de uniones mecánicas reviste singular importancia para la solución de otros cometidos que requieren de la laminación. A través de la investigación histórica y de los resultados obtenidos en una simulación mecánica, se presentará la concepción del diseño, construcción y comportamiento estructural de la estructura de cubierta de la Basílica de Pátzcuaro. Desarrollo: Madera laminada apernada, tecnología centenaria aplicada a una estructura que se basa en arcos laminares unidos con elementos mecánicos: pernos, cinchos, sin pegamento, Ubicando el edificio en el tiempo y en el espacio se trata de un inmueble del siglo XVI, a alrededor de los mil quinientos... cuatrocientos años. ¿O de que antigüedad?, ¿Uniones mecánicas, sin pegamento?, ¿Cómo se comporta?, ¿La madera laminada no es acaso una tecnología actual?. El análisis de la cubierta de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud da la base para otras investigaciones sobre madera laminada apernada pues, aunque de momento no exista ninguna norma o regla de cálculo para este tipo de estructuras, cierto es que esta tipología responde satisfactoriamente a los requerimientos solicitados, tanto desde el punto de vista arquitectónico, como el estructural.

Palabras-clave: madera laminada, uniones mecánicas

Abstract

Introduction: If we conceive of laminated wood as a single unit, basing on the bond that guarantees the glues used today, the analysis of a laminated structure without glue but through mechanic joints is of particular importance for the solution of other tasks that require lamination. Through historical research and the results obtained in a mechanical simulation, the conception of the design, construction and structural behavior of the roof structure of the Basilica of Patzcuaro will be presented. Developing: Laminated bolted wood, century-old technology applied a structure that is based on laminar arcs joined with mechanical elements: bolts, webbing, without glue. Locating the building in time and space is a 16th century building, around fifteen hundred ... four hundred years ... Or how old?. Mechanical joints, without glue? How it behaves?, Is laminated wood not a current technology ?.The analysis of the roof of the Basilica of Our Lady of Health, gives the basis for other research on laminated wood bolted, because although there is no rule or rule of calculation for this type of structures, it is true that this typology responds satisfactorily to the requested requirements, both from the architectural point of view, as the structural one.

Keywords: laminated wood, mechanical joints



1. INTRODUCCIÓN

Es un caso especial, por tratarse de una solución constructiva única en el territorio michoacano y posiblemente difícil de encontrar en otras partes de nuestro país.

La iglesia de Pátzcuaro, obra ideada por Vasco de Quiroga, tiene en la actualidad una cubierta que fue colocada entre 1872 y 1883, periodo en cual se realizaron fuertes obras de remodelación, y que coincide con la etapa temporal en la cual fue ideado por M. Emy este sistema.

Esta cubierta está elaborada con arcos laminares, alfaridas, jambas verticales de contrarresto (jabalcones), tirante horizontal y cruceros construidos de madera; pernos y estribos de elaboración metálica. El claro que libra en total es de 16.40 metros de paño a paño interno, apoyándose el sistema sobre una superficie que se logra a través de un escalonamiento en el muro con una amplitud medida de 1.20 metros cada uno; a esto debe agregarse la porción complementaria de muro y pretil que alcanzan 2.10 metros de espesor en cada lado, con lo cual se tiene una amplitud, a paños exteriores de 23.00 metros, los muros en total tienen un espesor de 3.30 metros medidos en la base donde nacen los arcos que son segmentos de círculo de casi 8.20 metros de flecha medida al intradós. Del intradós a la cumbre (la parte más alta al exterior de la cubierta) se miden 5.25 metros de altura, con lo cual se alcanzan 13.45 metros de longitud, medida desde la cuerda hasta la cúspide de la cubierta. [Torres, 1999].

Siendo un sistema único en el país, es que se analiza desde el punto de vista mecánico con el propósito de proporcionar la mayor información posible que permita su conocimiento y socialización en aras de ayudar en otras soluciones actuales.

2. METODOLOGÍA

Por lo anteriormente mencionado se presenta una descripción de la cubierta y sus elementos en una primera parte y un resumen del análisis mecánico de la cubierta en un segundo momento.

2.1. Descripción de la cubierta

La revisión se realiza por analogía, abordando como antecedentes el sistema ideado por ingeniero militar M. Emy, ya que se considera que el autor anónimo de la obra en Pátzcuaro aplicó este sistema atendiendo a los requerimientos que deberían cubrirse. (Fig.1)

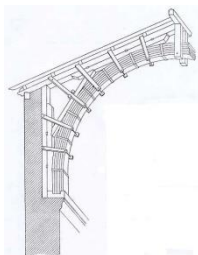
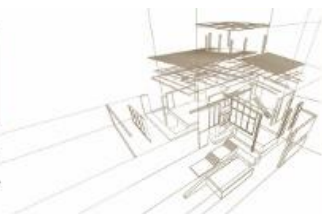


Figura 1: Armadura Emy [Mendez, 1996]



Se desconoce quién fue el constructor de esta obra; sin embargo, es notorio el conocimiento de causa que le permitió decidir su aplicación.

Este sistema, aplicado en la Basílica de Pátzcuaro, está construido por medio de arcos formados por tabloncillos, solución única en la región y en el país. Por esta razón y dadas sus virtudes estructurales, merece un análisis especial donde se pongan de manifiesto sus características y condiciones de diseño.

El análisis se presenta a través de una revisión por analogía con el tipo de solución francesa ideada por el Ing. Militar M. Emy para cubrir un claro de 20 mts. En un cobertizo para usos agrícolas (Fig.2).

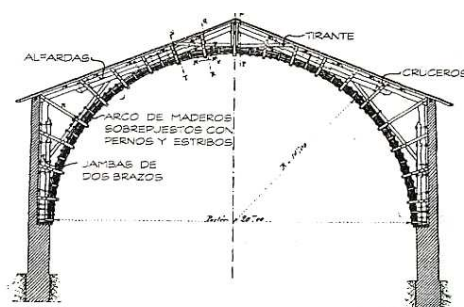


Figura 2: Estructura de M. Emy en Francia para un claro de 20 m. [Torres, 1999]

Esta solución parece, por los datos obtenidos, haber sido el modelo de la aplicación en la Basílica de Pátzcuaro, buscando terminar con los desastres anteriores, motivados por constantes movimientos sísmicos.

El sistema ideado por Emy, denominado como estructura de arcos formados por tabloncillos curvos sobre su plano horizontal, está compuesto por largos maderos de pino, superpuestos entre sí a manera similar como se colocan las muelles de suspensión de un carro y cuya forma es curva sobre el espacio que se pretende cubrir.

La forma de unir esta sucesión de láminas de madera es por medio de pernos y estribos metálicos, colocados los primeros a través de una perforación central y los segundos abrazando los maderos para lograr la sujeción. (Fig.3)

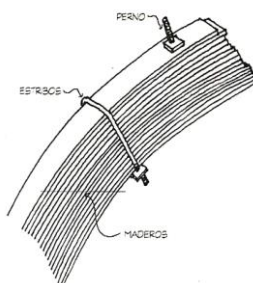
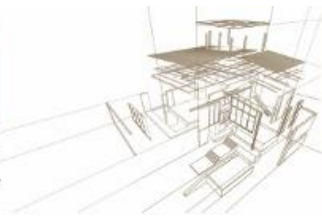


Figura 3: Sistema de M. Emy. [Torres, 1999]

Cuando los maderos no son suficientemente largos para formar el arco de una sola pieza, se ensamblan en liga, teniendo cuidado de que las juntas no tengan coincidencia con los riñones cuando se trata del extradós ni en la cúspide del arco, cuando se trata del intradós.



Los pernos, cuya longitud depende del espesor del arco están espaciados a cada 0.80 mts. , de eje a eje con un diámetro de 19 mm. Los estribos se colocan en los intervalos de los pernos para componer el conjunto de elementos de sujeción de los maderos, dando la forma deseada del arco.

Sobre cada uno de los arcos descritos, se colocan vigas a manera de alfardas y jambas verticales de contrarresto llamadas jabalcones (Fig.4), armadas de dos brazos tensores y de un tirante horizontal que funciona a manera de nudillo; cierran el sistema, una serie de cruceros colocados normalmente al arco.



Figura 4: Jabalcón (jambas) y estructura actual [Torres, 1999 – dibujo propio]

El arco es entonces la pieza principal de todo el conjunto y es en su forma y disposición constructiva que reside la fuerza de sustentación y las demás ventajas inherentes a su gran capacidad de soporte y alcance de claro libre [Torres, 1999].

Las jambas de dos brazos (jabalcones), se ubican a una distancia de 10 centímetros de los muros, pero los tres primeros cruceros de cada lado, se prolongan más allá de éstas, penetrando 20 centímetros en compartimientos, preparados en los muros, de 30 centímetros de profundidad. Esta solución no persigue apoyarse en la mampostería de los muros ya que la estructura descrita no produce esfuerzos. Se trata exclusivamente de mantener los maderos en planos verticales y de impedir el balanceo de la estructura en el sentido de la longitud del edificio. Además de que en dicho sentido, un aporte importante para la estabilidad lo da el punto central del ábside y el apoyo de la hilera principal en el muro de fachada.

Los cruceros, los estribos y los pernos hacen que cada una de las componentes laminares del arco trabajen solidariamente unas con otras para presentar oposición contra la natural tendencia a enderezarse.

El arco se conforma de 18, 24 y 14 tablones de manera simétrica, en donde a partir de los apoyos, los primeros cuatro tramos que conforman los cruceros constan de 18 piezas de 5"x 1", originando una sección compacta de 5"x 18"; el siguiente tramo está constituido por 24 tablones de igual escuadría, formando entonces una sección de 5"x 24" y por último los ocho tramos restantes se disminuyen a 14 tablones, por tanto se tiene una sección de 5"X 14".



Destaca en la solución de la Basílica, el refuerzo en el área de los riñones para mejorar las condiciones estructurales y la disminución de componentes entre los riñones para propiciar un aligeramiento y disminuir los pesos propios del arco, aspecto que quizás proporcionó al constructor de esta cubierta, la posibilidad de eliminar los brazos tensores. [Torres, 1999]

Las jambas o jabalcones, en este caso, están colocadas ligeramente inclinadas al exterior, son más cortas y permanecen al igual que el modelo francés, flejadas por medio de estribos metálicos y encachetadas por medio de cortes diagonales y transversales para evitar el deslizamiento. (Fig.5)



Figura 5: Jabalcón actual [Méndez, 1999]

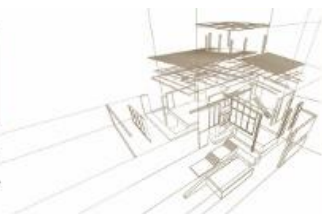
En relación con las alfardas, (Fig.6) éstas se ubican con una inclinación sensiblemente mayor, mientras el modelo de Emy mantiene una inclinación de 28 grados, lo cual motiva las jambas más alargadas al igual que los muros, el caso local es de 42 grados de inclinación, propiciando vertientes sumamente peraltadas y jambas o jabalcones cortos (3.80 metros) El refuerzo de las alfardas se soluciona de igual manera, a través de los estribos metálicos repartidos a los lados del refuerzo que también se ensambla por medio de cortes diagonales y transversales para formar escalonamientos que evitan los deslizamientos. [Torres, 1999]



Figura 6: Alfardas [fotografía propia]

El tirante tangencial al extradós del arco, es un elemento permanente al igual que el diseño de origen, se enlaza con las alfardas y cruceros que componen el sistema, los ensambles se solucionan a través de cortes a media madera encachetando las piezas por ambos lados y sujetándolas por medio de pernos metálicos.

Otros aspectos importantes que deben ser mencionado es el concerniente a la conformación constructiva en el área del ábside. Con toda habilidad se conformaron



medios arcos colocados en forma radial, siguiendo el recorrido circunférico del presbiterio. En la cúspide, donde confluyen estas mitades de arcos y coinciden con el primer arco transversal de la nave, se forma un trompo construido de madera que funciona como llave para recibir las estructuras y cerrar el sistema de arcos. (Fig.7)



Figura 7: Ábside [fotografía propia]

Complementan el sistema, largueros de vertientes, hilera, fajillas y tejas; estas últimas, por razón de las vertientes sensiblemente inclinadas, están elaboradas con tacones en los extremos para enlazarse entre ellas mismas y las fajillas.

2.2. Análisis estructural de la cubierta

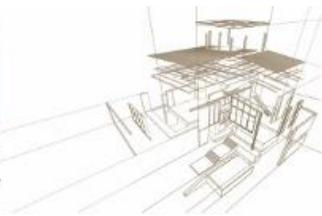
Esta cubierta como se comentó está realizada con arcos laminares, alfardas, jambas verticales (jabalcones) y tirante horizontal; todo de madera y unido con pernos y estribos de elaboración metálica. El claro que libra en total es de 16.40 metros de paño a paño interno, apoyándose el sistema sobre una superficie que se logra a través de un escalonamiento en el muro.

El arco laminar, elemento principal de la estructura se conforma por tablones curvos sobre su plano horizontal compuesto por largos maderos de pino, superpuestos entre sí y unidos con pernos y estribos metálicos, colocados los primeros a través de una perforación central y los segundos abrazando los tablones.

Sobre cada uno de los arcos descritos, se colocan vigas a manera de alfardas, que dan forma a la doble vertiente exterior y jambas verticales llamadas jabalcones, armadas de dos brazos tensores y de un tirante horizontal que funciona a manera de nudillo; cierran el sistema, una serie de cruceros colocados normalmente al arco (Fig.8).



Figura 8: Partes componentes [fotografía personal]



En cuanto a las dimensiones de los elementos, presenta diferentes secciones y detalles constructivos ilustradas en la siguientes figuras:

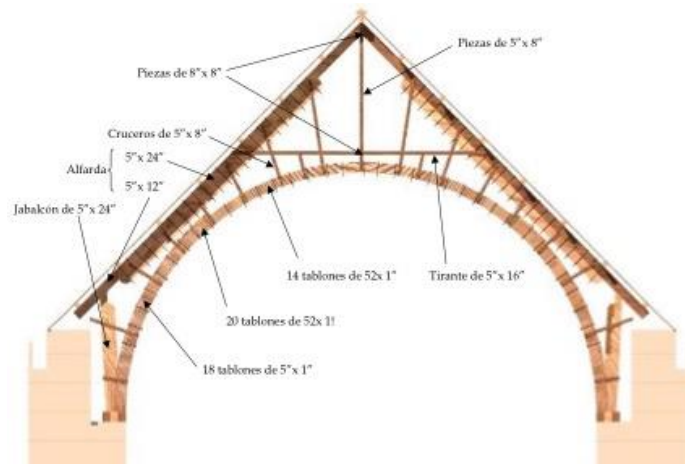


Figura 9: Dimensiones de los componentes [dibujo propio]

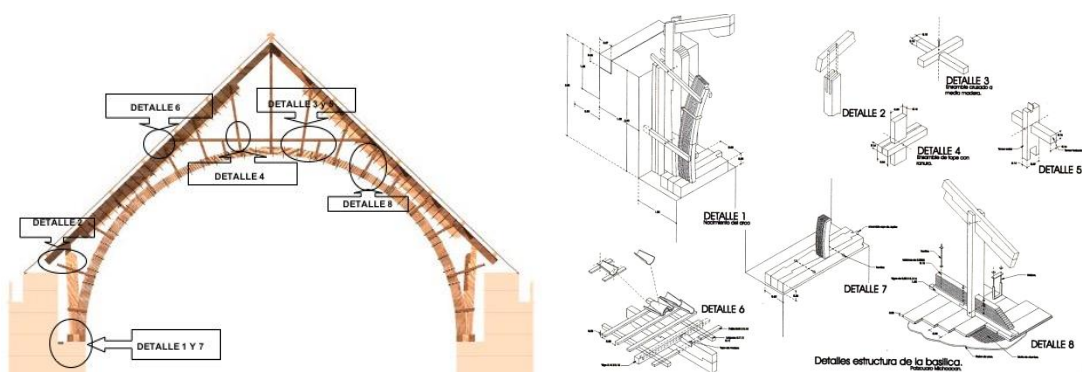


Figura 10: Detalles constructivos [dibujos propios, Méndez, 1996]

Tanto arco, jabalcones, alfardas y tirantes son piezas que trabajan como secciones integras en si mismas y por tanto así se modelaron; en tanto los cruceros se articulan con sus correspondientes enlaces en el plano de la armadura, quedando restringidos en los otros dos planos.

Con la información anterior se modeló la estructura en el sistema computarizado en el programa AVwin 98, plusV2.0 que permite conocer las distintas tensiones a las que se someten los miembros componentes y asimismo realizar la verificación de las secciones, y finalmente se verifican algunas secciones representativas del sistema a través del programa de cómputo "Diseño y verificación de piezas estructurales de madera según NCh. 1198 Of.91", elaborado por Cecilia Poblete Arredondo, arquitecto y Mario Bravo Molina, Ing. informático.

Para la modelación se establecieron tres consideraciones:

El peso propio, donde se considera además del peso del material mismo, todos aquellos que contiene la estructura misma: teja, yeso, etc.



La sobrecarga, considerándose esta solo sobre los tirantes y viga longitudinal que corre a la misma altura de aquellos; sitios donde únicamente es posible que esta exista, por la morfología misma de la estructura.

El viento, donde se estimo con una presión básica de 80 kg/m

Aquí un par de imágenes representativas del análisis en el programa:

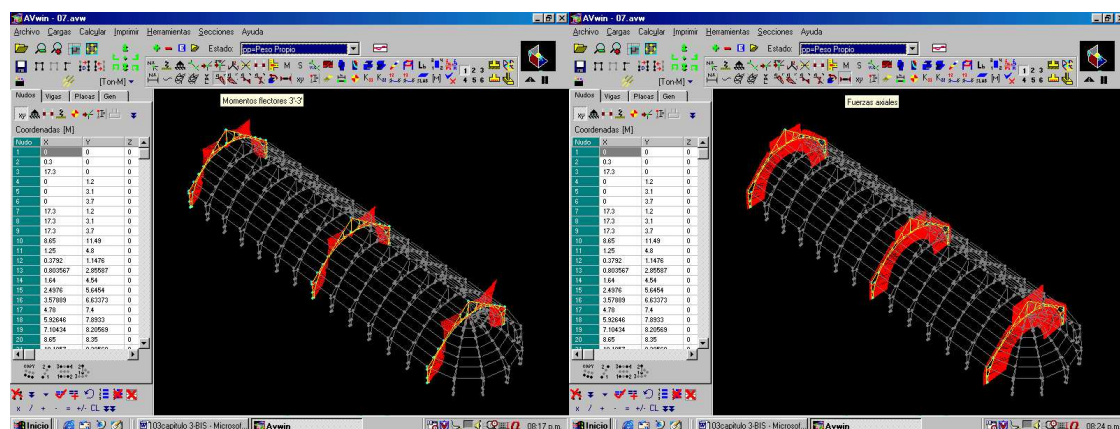


Figura 11: Momentos flectores alrededor de 3, siendo 3 un eje paralelo al longitudinal de la cubierta y Fuerzas axiales [AVwin 98, personal]

Ahora bien, una vez identificados todos los datos y modelados en el programa, además de obtener los resultados completos del análisis estructural se procedió a la verificación de secciones con el programa ya mencionado.

La secuencia en como se presentan los resultados es la siguiente:

En primer lugar los datos correspondientes al primer arco, que corresponde al arco que recibe los medios arcos que conforman el ábside. En segundo lugar los datos de verificación del arco central, que corresponde precisamente al arco situado en la zona media de toda la estructura, se toma este al observar la totalidad de los resultados y darnos cuenta que este representaba los arcos intermedios. En tercer lugar el último arco, que es el situado al final de la estructura, aquél que ya no continúa más allá y presenta una diferencia de cargas con respecto al resto de los arcos.

Y finalmente los medios arcos del ábside, en los que sobra decir son solo mitades de los restantes y por tanto con solicitaciones diferentes.

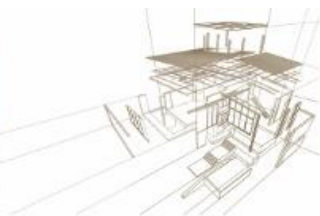
Las características generales de la madera que se verificó fueron las siguientes:

Pino Oregón, Grado 3, Contenido de humedad <30%, Grupo ES5, Clase F11.

Se verificaron los siguientes efectos: flexión, cizalle, compresión axial, tracción axila y torsión.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los anteriores resultados es obvio comentar que todos y cada uno de los distintos elementos que conforman la estructura, cumplen satisfactoriamente con las exigencias de la norma chilena, no se debe olvidar que las verificaciones se hicieron



proponiendo un grado 3 para la calidad de la madera, no obstante tratarse de una madera de mejor calidad, pues en una observación ocular de la misma, sin llegar a realizar una clasificación rigurosa es innegable que la madera allí utilizada es de calidad superior.

En todas las verificaciones efectuadas la tensión de trabajo fue inferior a la tensión de diseño, en ningún caso esta última se vio rebasada y esto posibilita a pensar que si se realizara una obra igual a la del presente trabajo, con una madera de mejor calidad, sería posible disminuir las secciones, con lo que la carga transmitida a los muros sería rebajada; sin embargo este último tema parece no ser problema al observar la robustez de los muros de la basílica, no se olvide que originalmente se pensó en cubrirla con bóvedas de crucería.

En este capítulo se describió de manera detallada todos y cada uno de los elementos que conforman la estructura de la cubierta, así como las características del material, de tal forma que fue posible modelarla en el programa de AVwin y una vez realizado los análisis estructurales de la misma se pudo conocer las distintas tensiones a las que se someten los miembros componentes. La totalidad de los resultados arrojados por el análisis se presentan en el apéndice A al final del trabajo, por razones de tamaño se entrega dicha información en un disquete, puede ser leída a través de cualquier procesador de texto.

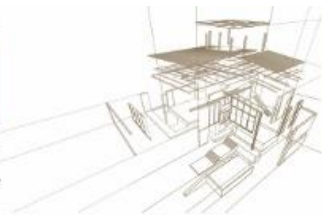
Posteriormente se realizó la verificación de las secciones, en el programa de Diseño y Verificación de secciones según NCh 19998 Of. 91, y se observó que es posible proponer disminuir la escuadría de las secciones, siempre y cuando se trabajase con una grado de madera de mejor calidad, lo anterior con el objeto de disminuir peso y volumen de la cubierta, lo que repercutiría en costos por mencionar un caso.

4. CONCLUSIONES

La cubierta de esta basílica, es un fenómeno constructivo, que merece una atención especial, por la necesidad de la comprensión de la tecnología, pues a través del estudio de la misma, se aporta al conocimiento de la misma.

El análisis de la cubierta de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, da la base para otras investigaciones sobre madera laminada apernada, pues aunque de momento no exista ninguna norma o regla de cálculo para este tipo de estructuras, cierto es que esta tipología responde satisfactoriamente a los requerimientos solicitados, tanto desde el punto de vista arquitectónico, como el estructural. Pero además, existen otras tantas construcciones en madera, construcciones olvidadas por la invasión del cemento y el acero.

La cubierta actual, con intradós cilíndrico, se inspiró en soluciones tomadas de tratados franceses, aunque adaptada con gran ingenio. Ahora bien, respecto al análisis estructural y a la verificación de las secciones realizada en el presente trabajo viene a demostrar la amplia experiencia que el constructor tenía sobre el material madera y sus características, pues evidente es su adecuación con un profundo conocimiento del comportamiento del sistema. No perder de vista que se trata de un elemento laminar apernado, ejecutado in situ, gran diferencia con respecto a la madera laminada encolada.



Debo comentar que la posibilidad de analizar concienzudamente este tipo de madera laminada (apernada) es un reto para profundizar en su estudio y análisis, pues presenta una tecnología rescatable en la medida que se avance en su conocimiento. El hecho de prescindir del pegamento para el laminado y por tratarse de una estructura que puede elaborarse en el sitio, justifica la acción de voltear atrás en el tiempo para conocerla, estudiarla y utilizarla.

Sin embargo, no basta con tener experiencia en el uso de la madera, se requiere un conocimiento profundo del comportamiento estructural que tiene y debemos aprovechar los avances de la tecnología para ello.

No caigamos en el error de que por tener al alcance una tecnología superior, debemos considerarnos poseedores de un conocimiento mayor, Esta cubierta nos dice lo contrario o al menos nos hace una llamada de atención para considerar esta tecnología de laminado sin pegamento, como una posibilidad de solución factible y confiable.

Hace falta estudiar más al respecto de la madera laminada apernada, con el ánimo de rescatarla ya que el conocimiento a detalle de todos y cada uno de los elementos que conforman la estructura de la cubierta y de las así como las características del material, permitió la modelación en el programa de AVwin, modelación que trato de responder lo más fielmente posible a las características de cada uno de los elementos y a la cubierta en general.

Y considero que de acuerdo a los datos obtenidos, tanto en el análisis estructural, como en la verificación de las secciones, permite asegurar que la modelación responde en un alto porcentaje a lo que ocurre en la realidad y por lo tanto es posible establecer conclusiones al respecto.

Posteriormente con la verificación de las secciones, en el programa de Diseño y Verificación de secciones según NCh 19998 Of. 91, se comprobó que se cumple cabalmente dicha norma.

Esto permitió proponer una disminución de la esquadría de las secciones, mejorando la calidad de la madera, lo anterior con el objeto de disminuir peso y volumen de la cubierta, con el único propósito de hacer un análisis comparativo entre ambas soluciones.

Esto no fue otra cosa que una serie de aproximaciones a rediseñar las distintas secciones que componen la estructura con el propósito de aprovechar el conocimiento que el estudio que esta estructura deja en su análisis estructural.

Para ello se procedió de forma inversa a como se realizó el estudio, es decir se partió de los resultados comparativos entre las tensiones de diseño y las tensiones de trabajo, y a partir de allí, se encontraron secciones transversales para cada uno de los elementos, con estas obtenidas procedió a modificarlas en el programa de análisis y se recalcularon las fuerzas actuantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bassegoda Nonell, Juan. (1976). Historia de arquitectura. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, España.



Bérchez, Joaquín. (1992). *Arquitectura mexicana de los siglos XVII y XVIII*. (col. Arte Novohispano). Azabache. México.

Instituto Nacional de Normalización, INN. (1991). *Norma Chilena: NCh 1998 Of.91. Madera – Construcciones en Madera – Cálculo*. Santiago, Chile.

Kubler, George. (1948). [Arquitectura mexicana del siglo dieciséis] *Mexican architecture of the sixteenth century*. Tomo I y II. Greenwood Press, Publishers. Westport, Connecticut, EUA.

Méndez, Francisco. (1996). *Basílica de Nuestra Sra. De la Salud, plano corte transversal y detalles para el Proyecto de Restauración de la Cubierta Principal*. Pátzcuaro, Mich., México.

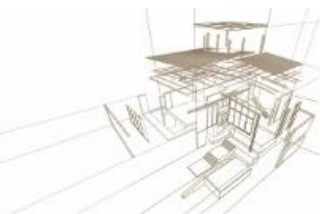
Poblete Arredondo, Cecilia. (2000). *Adaptación del sistema chileno de normas para el cálculo de construcciones en madera*. Memoria de tesis. Université Catholique de Louvain. Bélgica.

Torres Garibay, Luis Alberto. (1999). *Tecnología constructiva en la zona lacustre de Pátzcuaro y región Morelia*. Universidad Mchoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. México.

SOPORTE LÓGICO

Arredondo Poblete, Cecilia. (2000). *Diseño y verificación de piezas estructurales de madera según NCh 1198 Of.91*. Programa para computador. Concepción, Chile. PC.

AVwin 98, plusV2.0. (1998). Programa para computador. Avansse International, Inc. Columbia MD, Estados Unidos de América. PC.



FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE EDIFICIO DE MEDIANA ALTURA ESTRUCTURADO EN CLT EN ZONAS DE ALTA SISMICIDAD

TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF A MID-RISE CLT BUILDING IN HIGH SEISMICITY AREAS

Zurita, Claudio ^{(1)*}; Valdivieso, Diego ^{(2) (3)}

⁽¹⁾ Estudiante Ingeniería Civil. Universidad Andrés Bello. Santiago, Chile

⁽²⁾ Dr. (c) Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

⁽³⁾ Ingeniero Estructural. Departamento de Ingeniería. Simpson Strong - Tie. Santiago, Chile

* Contacto: czuritamilon@gmail.com

Resumen

La utilización de madera en Chile es reducida, considerando el alto nivel de producción de la materia prima en el país. En base a esta línea, este estudio busca promover la utilización de madera contralaminada (CLT), desarrollando un proyecto de vivienda social de mediana altura construido en madera contralaminada cumpliendo los estándares del MINVU, con el objetivo de realizar una factibilidad técnico – económica del edificio. Para el diseño estructural se consideró marco regulatorio nacional e internacional. Como referencia, se utilizó proyecto presentado por grupo CLT Chile (González et al. 2014), asignando emplazamiento en la ciudad de Concepción debido al auge que experimenta la región en estudios del mencionado material. La propuesta se comparó económicamente con una edificación de igual geometría elaborada en hormigón armado, equiparando capacidades térmicas de la envolvente en ambos tipos de estructuración. El análisis estructural, en ambos casos, entregó espesores incapaces de dar cumplimiento a normativa térmica y acústica nacional, por lo que se desarrollaron soluciones de esta índole. Posteriormente, se analizó los tiempos de ejecución, donde la madera contralaminada posee ventaja producto de su modalidad de construcción; a través de rendimientos del mercado nacional en cada material, se desarrolló una estructura de descomposición del trabajo (WBS), analizando obra gruesa y terminaciones. Finalmente, el precio total para hormigón armado es menor en un 10,2% respecto de estructuración mediante CLT, a pesar que este reduce plazos de ejecución en un mes para el proyecto de estudio. Con mayor cantidad de niveles no se logra apreciar una tendencia favorable en el ámbito económico para el CLT.

Palabras claves: Madera Contralaminada; MINVU; Envolvente; WBS.

Abstract

The use of wood in Chile is reduced, considering the high level of production of the raw material in the country. Based on this line, this study seeks to promote the use of cross laminated timber (CLT), developing a CLT mid-rise social housing project to meet the standards of MINVU, with the aim of making a technical-economic feasibility of the building. National and international regulatory framework are considered for the structural design. As reference, the project presented by group CLT Chile (González et al. 2014), was used, locating the building in Concepción city due to the boom experienced by the region in studies of the aforementioned material. The proposal is economically compared with a construction with the same geometry elaborated in reinforced concrete, equating thermal capacities of the envelope in both types of structuring. The structural analysis, in both cases, delivers thicknesses incapable of complying with national thermal and acoustic standards. Due this, solutions was developed for improve this situation. Subsequently, the construction times were analyzed, where the cross laminated timber has advantage for its construction modality; a work breakdown structure (WBS) was developed based in the performance of each material in the national market, analyzing rough work and finishing. Finally, the total price for reinforced concrete is less than 10.2% of respect for structuring by the CLT, despite reducing execution times by one month for the project study. With more levels, a favourable trend in the economic field for the CLT cannot be seen.

Keywords: Cross Laminated Timber; MINVU; Envelope; WBS.



1. INTRODUCCIÓN

La madera contralaminada (CLT) cuenta con alrededor de 20 años de maduración desde su invención en Europa, transcurso en el cual, logra la atención mundial con rápida aceptación en Estados Unidos y Canadá. Prácticamente la totalidad de su utilización se ha ejecutado en zonas de baja sismicidad, pero hoy en día existe una tendencia a desarrollar este tipo de proyectos en zonas de alta sismicidad, por ejemplo, Italia y la costa oeste de Canadá y Estados Unidos.

Este material ha tenido tal nivel de aceptación gracias a sus propiedades, entre las que destacan la baja transmitancia térmica, disminución de la contracción y alabeo, resistencia a cargas transfiriéndolas en todas las direcciones, alta estabilidad dimensional en el plano con hinchazón minimizada, ductilidad y disipación de energía requerida proporcionada por uniones. Además, como es propio de esta materia prima, cuenta con características que aportan una baja huella de carbono. El sistema constructivo, es en “seco”, mediante paneles prefabricados entregando una alta precisión, reducida cantidad de desechos y disminución sustancial en los tiempos de construcción en relación a otros métodos constructivos. Por ejemplo, reducciones del periodo de construcción que van entre 30% y 50% en comparación con misma edificación mediante hormigón armado (Madera 21 2018).

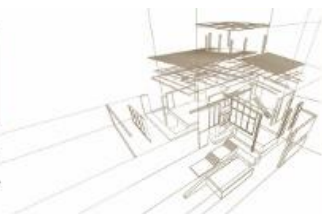
En lo que respecta a CLT en Chile, existe interés por un grupo minoritario considerando la cantidad de profesionales en el rubro de la construcción, producto de las barreras generadas por la inexistente normativa nacional para la madera contralaminada, las restricciones que impone la normativa vigente para edificación NCh 433 (INN 1996) y la escasa disponibilidad de estudios con información técnica realizados en la región. Sin embargo, destacan dos grandes grupos que han desarrollado estudios de CLT para Chile; las universidades y grupos asociados a la industria maderera de la región del Bío-Bío, debido a la gran disponibilidad de materia prima en dicha zona; y por otra parte, proyecto realizado por el grupo CLT Chile financiado por Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), que presenta un extenso estudio de cómo implementar la modalidad CLT, elaborando inclusive, un anteproyecto de norma (González et al. 2014).

En base a lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo un análisis técnico - económico de un edificio de mediana altura ubicado en la ciudad de Concepción, Chile, estructurado en base a paneles de CLT modulado en paneles de dimensiones máximas 1,2 m x 2,4 m. Este es contrastado con edificación de igual geometría en hormigón armado (HA). El desarrollo, se realizó en primera instancia, con modelos estructurales en cada material, luego, soluciones térmicas y acústicas equitativas generando punto de comparación, dando paso a finalización mediante estudio de costos. Todo en base a los requerimientos normativos nacionales e internacionales, según aplique.

2. METODOLOGÍA

2.1. Revisión bibliográfica y normativa

Estudio del concepto de construcción en CLT y sus características, exigencias de las normativas nacionales vigentes, incluyendo requerimientos del Ministerio de Vivienda y



Urbanismo a través de Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, OGUC (MINVU 2018). Además, solicitud de cotizaciones y especificaciones técnicas a diferentes empresas, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de precios.

2.2. Modelación y análisis estructural

Los modelos estructurales se basan en proyecto de grupo CLT Chile (González et al. 2014). Desde donde se adquieren dos estudios:

- 1) Proyecto de arquitectura; utilizado para definir geometría en la cual se basarán las comparaciones. Dimensiones exteriores 20,64 m x 7,20 m, con una altura hasta la losa de cubierta de 10,08 m.
- 2) Estudios de caracterización mecánica y comportamiento histerético de paneles de CLT construidos en Chile con Pino Radiata (Pérez et al. 2017). Con la finalidad de obtener caracterización de paneles, por similitud a los que se obtuvo precio.

El análisis estructural de edificio en madera contralaminada es realizado mediante software ETABS y SAFE. Se siguen las disposiciones del manual de diseño en este material (FPInnovation 2013), que se basa en la estandarización americana para madera contralaminada PRG-320 (ANSI/APA 2012) y se complementa en normativa de maderas estadounidense (NDS 2018). Además se aplican requerimientos de la normativa nacional de diseño en maderas NCh 1198 (INN 2014a) y normativa sísmica Chilena NCh 433 (INN 1996), ver Figura 1. El caso de hormigón armado, se determina a través de igual normativa nacional sísmica, caracterizándolo como análisis estructural tipo prediseño, el cual es complementado con experiencias de profesionales consultados.

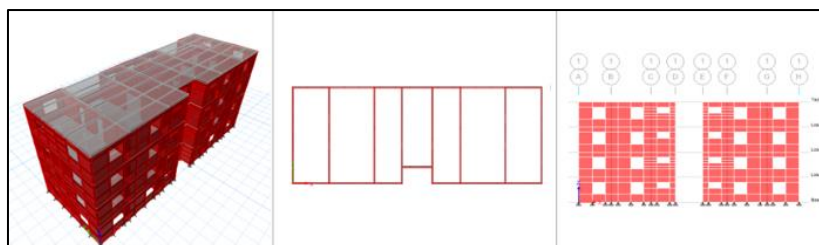


Figura 1: Perspectivas de modelo en madera contralaminada

Las cargas a considerar en la modelación estructural para ambos materiales son, solicitud sísmica, de viento y sobrecarga de uso. Para la obtención de estas se basa completamente en normativa Chilena.

2.2.1. Edificación CLT

Se utiliza sistema constructivo tipo plataforma. El factor de modificación de la respuesta estructural mediante análisis estático, R , es igual a 2, producto que el material no clasifica en ninguna de las categorías establecidas en normativa sísmica nacional NCh 433 (INN 1996), además esto ha sido sugerido por grupo CLT Chile (Pérez et al. 2017). Las combinaciones de carga se establecen mediante tensiones admisibles.



Los paneles se componen por tres capas de 40 mm de Pino Radiata con espesor de 0,12 m, ancho máximo de 1,20 m para todos los paneles. En muros la longitud máxima es de 2,40 m, mientras en losas es de 3,72 m. Las propiedades mecánicas para muros de CLT se encuentran en Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas paneles CLT

Peso específico	445	Kgf/m ³
Módulo de Elasticidad (E0)	9920,00	MPa
Módulo de Elasticidad (E90)	330,67	MPa
Módulo de Corte (G0)	661,33	MPa
Módulo de Corte (G90)	66,13	MPa
Rigidez a flexión (EI aparente)*	168,56	Tonf*m ²
Módulo de Elasticidad panel (E)	9566,00	MPa

Elemental para la correcta modelación en software, radica en aplicar liberación de los momentos en los extremos de las losas, y representar rigidez fuera del plano de muros y losas con los valores presentados en Tabla 2.

Tabla 2: Rigidez de elementos CLT a cargar en modelación estructural.

Elemento	Rigidez	Unidad
Losas	4135	kN/m
Muros	13233	kN/m

Los periodos para la estructuración se presentan en Tabla 3, Cumpliendo el 90% de la masa movilizada (según normativa sísmica), en ambas direcciones para el modo 6.

Tabla 3: Modos de vibrar para estructuración en CLT.

Dirección	Masa movilizada	Periodo
X	88,06 %	0,235 s.
Y	87,26 %	0,173 s.
Z	87,18 %	0,166 s.

Para sismo X en la misma dirección, se presenta Figura 2 a), mientras que para el sismo Y en esta dirección, resulta la Figura b).

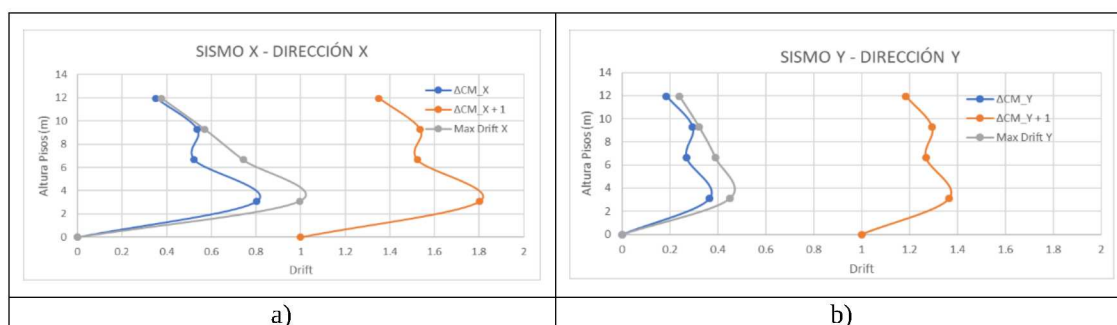


Figura 2: Desplazamientos sísmicos dirección X e Y para CLT

Desde la Figura 2, se puede visualizar que en ambas direcciones, se cumple con los requerimientos por normativa sísmica nacional NCh 433 (INN 1996), puesto que el desplazamiento entre pisos se encuentra por debajo del desplazamiento de centro de



masa más la unidad y el centro de masas es menor a 2 para todos los pisos de edificación.

El comportamiento es bastante distinto a una estructuración convencional, por su alto desplazamiento en losa de primer piso, disminuyendo en pisos superiores, por lo que se genera una elevada sollicitación en conectores del nivel con mayor desplazamiento. Lo cual se debe a rigidez que aportan los conectores utilizados.

En software de modelación (SAFE), se verifican las losas en cuanto a la deflexión admisible considerando carga de servicio, siendo el caso más desfavorable 4,43 mm ante una deformación admisible de 7,75 mm.

Las verificaciones a sollicitaciones se realizan con paneles dispuestos con fibras longitudinales para capas externas y transversales para capa intermedia, tanto para muros como para losas, puesto que de este modo las capas soportan de mejor manera la compresión, y la flexión, según su disposición. Tablones con mayor módulo elástico son ubicados en capas externas, por su desempeño en flexión respecto a la línea neutra, que provoca la mayor sollicitación en tracción o compresión en los bordes del panel. Respecto al análisis estructural, se basa en capítulo 3 de *Handbook USA* (FPInnovation 2013), verificando el cumplimiento para cada sollicitación máxima. El resumen de los datos relevantes para el diseño de losas y muros se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen diseño paneles losa y muro CLT

Diseño panel losa CLT			Diseño panel muro CLT		
Flexión	0,141	Cumple; <1	Compresión simple	0,176	Cumple; <1
Corte	0,144	Cumple; <1	Flexocompresión	0,213	Cumple; <1
Def. losa	468,542	Cumple; >300	Corte en el plano	0,391	Cumple; <1
Verif. Creep	7,213	< 7,500			
Comp. Normal	0.24	Cumple; <1			

De este modo se corrobora la correcta admisión de sollicitaciones de parte de paneles considerados. Con estado límite que controla el diseño para la verificación por creep.

2.2.2. Conexiones CLT

En general las uniones para CLT, son los mismos tipos de conectores empleados para el resto de las construcciones en madera. Siendo una especie de adaptación de los conectores empleados en el entramado ligero. Sin embargo, tiene la gran diferencia del resto de maderas por el comportamiento global, puesto que es bastante más rígido y con menos componentes y zonas de unión, necesitando de parte de los conectores, mayor capacidad en ductilidad y flexibilidad.

Compresiones normales de un panel a otro, se asumen transmitidas directamente mediante contacto de paneles, considerándolo como paneles articulados en cuanto a rotación fuera del plano.

Para encuentros de losa-losa y muro-muro, se utiliza empalme medio traslapado; en losa-muro y muro-muro con encuentro perpendicular, se disponen escuadras reforzadas; y en fundación - muro, se encuentran placa de corte y *holdown*. Tipos y cantidad de conexiones por encuentros entre paneles se exponen en Tabla 5.



Tabla 5: Verificación de deflexión en losas CLT

Conexión	Placa		Tornillos	
	Tipo	Cantidad	Tipo	Unidades panel
Losa-Losa	N/A	N/A	ESCR 8.0x100	9
Muro-Muro	N/A	N/A	ESCR 8.0x100	15
Losa-Muro	ABR105	6	CNA 4.0x40	144
Muro (encuentro)	ABR105	6	CNA 4.0x40	144
Fundación - Muro	ABR255	1	CNA 4.0x40	52
			LMAS M12x185	4
	HTT22	2	CNA 4.0x40	64
			LMAS M16x200	2

2.2.3. Edificación de hormigón armado

Se trata de un prediseño que busca establecer bases donde sustentar comparativa económica. Cabe destacar que se realizó cumpliendo sugerencias y/o requerimientos de normativas y códigos a los que aluden estas; (INN 1996) y (ACI 2014).

Para que un edificio de vivienda social sea rentable en su ejecución, se deben disponer muros con espesor de 15 cm y losas de 14 cm. Se consideran estas dimensiones.

Según normativa nacional sísmica NCh 433 (INN 1996), apartado 5, tabla 5.1, la estructuración para edificio en hormigón armado, entrega un factor de modificación de la respuesta mediante análisis estático, $R = 7$. Mientras que el factor de modificación de la respuesta mediante análisis dinámico (R_0) es 11. Diseño de hormigón armado se realiza por medio de combinaciones de carga para la resistencia última.

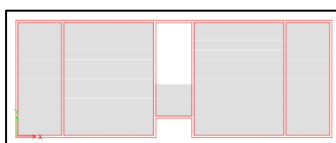


Figura 3: Disposición muros resistentes en hormigón armado.

Según la configuración de Figura 3, se obtienen los periodos presentes en Tabla 6. Alcanzando el 90% de la masa movilizada en ambas direcciones en el modo 5.

Tabla 6: Modos de vibrar para estructuración en hormigón armado

Dirección	Masa movilizada	Periodo
X	83,24 %	0,061 s.
Y	81,23 %	0,058 s.
Z	84.86 %	0,045 s.

Dichos periodos demuestran la elevada rigidez de la estructura en hormigón armado, por las dimensiones reducidas de la edificación, acotando la posibilidad de reubicación de muros, por distribución en espacios interiores.



Visualización de desplazamientos producto de solicitación sísmica para dirección X e Y en igual dirección, se presentan en Figura 4 a) y b), respectivamente.

Desde el análisis gráfico, que representa los requerimientos de la normativa sísmica nacional NCh 433 (INN 1996), se puede visualizar que en direcciones analizadas, se cumple con requerimientos.

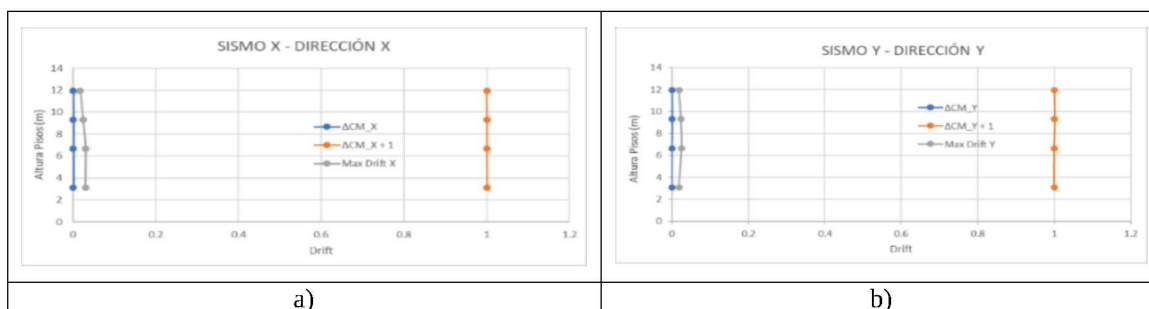


Figura 4: Desplazamientos sísmicos dirección X e Y para hormigón armado

Deformaciones en losas son analizadas de igual forma que en CLT. Dada la elevada rigidez de la estructura, la solicitación en ella es baja. Cumple con requerimiento normativo holgadamente; máxima deformación de 2,67 mm versus un admisible de 16,67 mm.

En Tabla 7 se establecen las armaduras requeridas para elementos horizontales, losas, y verticales, muros, dinteles, antepecho y escaleras.

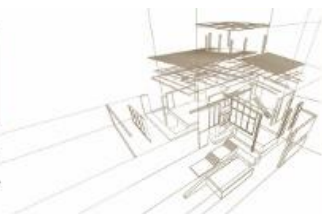
Tabla 7: Cuantía elementos verticales y horizontales en hormigón armado

Elementos horizontales			
Tipo Elemento	Cuantías por flexión	Cuantía al corte	Armadura
Losa	Por el mínimo (1,8‰)	No requiere	8@20
Elementos verticales			
Tipo Elemento	Cuantía	Armadura	
Muros	2,8‰	DM 8@25	
Dinteles y Antepecho	1,0%	N/A	
Escalera	1,0%	N/A	

2.3. Equiparación

La madera contralaminada posee ventaja térmica en comparación al hormigón armado para un mismo espesor. Aún con esta ventaja el CLT no cumple por si solo con los nuevos requerimientos térmicos a establecer en OGUC, por lo que se disponen soluciones aceptadas por normativa Chilena hasta dar cumplimiento. De modo similar, a la estructuración mediante hormigón armado, se agregan soluciones para establecer el punto de comparación térmico entre ambos materiales. Dado lo perjudicial que resulta la condensación, tanto superficial como intersticial, dentro de las soluciones térmicas, se consideró la determinación del riesgo asociado en base a normativa Chilena de comportamiento higrotérmico NCh 1973 (INN 2014 b).

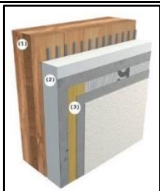
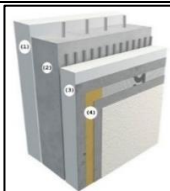
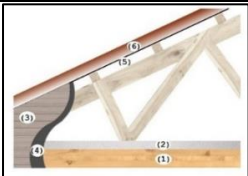
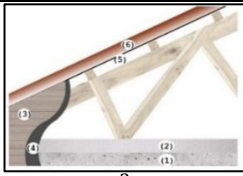


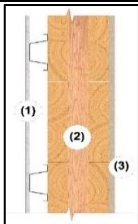
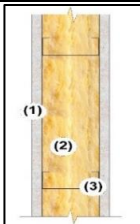
Por otra parte, estas soluciones deben cumplir con los requerimientos acústicos mínimos que establecen las normativas Chilenas. Las soluciones térmicas de la envolvente



incluyen estos mínimos; caso que no ocurre para elementos del interior de viviendas para el CLT.

Las soluciones que cumplen tanto térmica como acústicamente, evaluadas al riesgo de condensación, se presentan en la Tabla 8. Incluyen valores característicos respectivos.

Tabla 8: Soluciones térmicas y/o acústicas para ambas estructuraciones

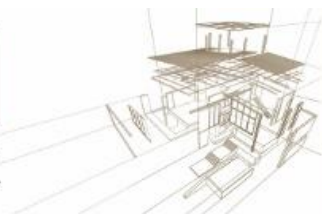
CLT	HA
Muros	
 2,451 ($m^2 * K/W$)	 2,284 ($m^2 * K/W$)
Techumbre	
 3,841 ($m^2 * K/W$)	 3,575 ($m^2 * K/W$)
Entre pisos	
 47 dB(A); 43 dB	 50 dB(A); 75 dB
Muros interiores	
 47 dB(A)	 47 dB(A)

2.4. Costos

Establecida la solución para equiparar capacidades térmicas en cada material, se realizaron las cubicaciones respectivas, asociando rendimientos con que se elaboró la WBS de cada material, obteniendo costos y tiempos de construcción; dicho procedimiento es enfocado a obra gruesa y terminaciones, donde se encuentra la variabilidad entre ambas estructuraciones. El resto de fases de construcción, se consideran iguales. Reuniendo el total de etapas del proyecto se obtienen los costos totales a analizar. Dichos datos son expuestos en Tabla 9.

Tabla 9: Costos totales de edificación analizada para ambas estructuraciones

	CLT	HA
Costos Complementarios	\$ 241.212.342	\$ 241.212.342



Costos Diferenciados		\$ 137.980.653	\$ 99.140.354
Total	Costo	\$ 379.192.995	\$ 340.352.696
	m2	594	594
	UF/m2	23,0	20,6
Diferencias	Monetaria	\$ 38.840.300	
	Porcentaje Diferencias	28,1%	
	Porcentual Total	10,2%	

Basado en discretización de costos por planta, se determinan precios totales en función de la cantidad de pisos. La Tabla 10, expone precios en moneda Chilena (CLP) y Unidad de Fomento (UF) por metro cuadrado, para estructuración mediante CLT versus hormigón armado. Considera área por planta de edificación en cuestión de 148,61 m².

Tabla 10: Variación de costos totales proyectados en mayor cantidad de niveles

Pisos	Precio Total CLT	Precio Total H.A.	UF/m2	UF/m2	Diferencia
4	\$ 379.336.773	\$ 340.383.523	23,0	20,6	2,4
5	\$ 464.303.381	\$ 413.303.117	22,5	20,0	2,5
6	\$ 549.269.989	\$ 486.222.711	22,2	19,6	2,5
7	\$ 634.236.597	\$ 559.142.304	22,0	19,4	2,6
8	\$ 719.203.205	\$ 632.061.898	21,8	19,1	2,6
9	\$ 804.169.814	\$ 704.981.492	21,7	19,0	2,7
10	\$ 889.136.422	\$ 777.901.086	21,6	18,9	2,7

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Estructura

Con la disposición de muros y losas para CLT, se logra dar cumplimiento a desplazamientos sísmicos impuestos por normativa nacional. Cabe destacar que dichos desplazamientos están cercanos al límite, por lo que agregar una mayor cantidad de pisos, implicaría una nueva disposición de muros resistentes, llegando inclusive a aumentar espesores de paneles.

Si bien se logra determinar el análisis estructural para madera contralaminada, es recomendable seguir realizando mayor cantidad de ensayos similar a lo realizado por grupo CLT Chile (González et al. 2014), en lo posible a escala real, que respalden su buen funcionamiento ante solicitaciones sísmicas. Teniendo importancia en la, determinación del factor de reducción de la respuesta estática que represente el real comportamiento del CLT. Puesto que, por el momento se determina en 2, versus un factor 7 para el hormigón armado. Lo que implica que, las solicitaciones sísmicas para el CLT disminuyen en dos veces, mientras que en hormigón armado se reducen en siete, lo que es determinante para la estructuración implicando un aumento en los costos para la madera contralaminada.

3.2. Costos

La edificación en hormigón armado tiene un menor costo total, siendo 10,20% más económico que la madera contralaminada, esto, a pesar que CLT demora



aproximadamente un 50% menos que el hormigón armado para el periodo analizado en detalle (obra gruesa y parte de terminaciones).

Aunque la diferencia en gastos generales al concluir edificación de CLT es favorable en \$18,76 millones (CLP), respecto a hormigón armado, el costo total alcanza una diferencia económica de \$38,84 millones (CLP) en beneficio opuesto. Lo que quiere decir, que los gastos generales considerando la diferencia en los plazos, no son capaces de amortiguar la diferencia en precios de materiales.

El análisis considerando mayor cantidad de pisos, demuestra que aún siendo más rápida la construcción en CLT, esta no alcanza a ser crucial para la disminución del costo total del proyecto, la cual sigue una tendencia lineal entre ambas estructuraciones. Lo que puede radicar en la reducida envergadura de cada nivel.

Como la gran ventaja del CLT, en términos económicos, es el tiempo de ejecución, se utilizó el caso utópico, para este estudio, de aumentar la diferencia en los tiempos de construcción por piso, con lo cual la tendencia creciente tiende a disminuir, pero no es suficiente para notar una menor diferencia que los cuatro pisos con los que se constituye edificación analizada.

No conforme con ello, se indaga en encontrar qué valor o tiempo es el preponderante; resolviendo que la diferencia en valor por piso de cada material es muy elevada evitando que la diferencia en los tiempos de ejecución sea relevante para los costos totales.

4. CONCLUSIONES

Es necesaria la implementación de normativa que regule el diseño de la madera contralaminada para el país, determinando un modo de cálculo. Esto llamaría la atención de más profesionales del rubro, puesto que no tendrían que realizar una extensa revisión bibliográfica para justificar el análisis estructural.

El CLT, según estos estudios, es un producto que no puede competir a la par del hormigón armado a menos que se desencadene un auge en su demanda, conllevando a la disminución de los precios por metro cúbico del material.

Si se añade en alguna instancia impuestos por desechos o contaminación, sería en directo beneficio a modalidad mediante CLT.

Por lo pronto, existen dos ventajas que pueden aplicar en la actualidad, su rápida ejecución, que en caso de necesitar viviendas prontamente sería una buena opción al considerar el costo de oportunidad; y su baja huella de carbono, que al cambiar el segmento hacia el sector privado, esta característica se presentaría como atrayente.

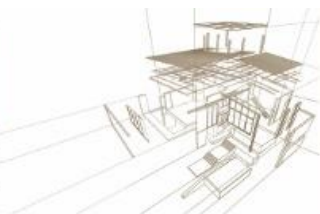
Como futura línea de investigación, se propone modulación de paneles con mayores dimensiones de las utilizadas en este estudio, lo cual es relevante en ámbito económico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute (2014). Requisitos de reglamento para concreto estructural. ACI 318S - 2014. New York, USA.



- American National Standard (2012). Standard for Performance-Rated Cross Laminated Timber. ANSI/APA - PRG 320-2012. USA.
- FPIInnovation. (2013). Cross Laminated Timber, USA Edition. CLT Handbook. USA.
- González, P., et al. (2014). Estudios de Ingeniería para Introducir en Chile un Sistema Constructivo de Rápida Ejecución para Edificios de Mediana Altura, Utilizando Elementos de Madera Contralaminada, Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (1996, Mod. 2009). Diseño sísmico de edificios. NCh 433. Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2000). Aislación acústica - Parte 1: Construcciones de uso habitacional - Requerimientos mínimos y ensayos. NCh 352/1. Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2007). Acondicionamiento térmico - Envoltura térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas. NCh 853. Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2014 a). Madera - Construcciones en madera - Cálculo. NCh 1198. Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2014 b). Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo. NCh 1973. Chile.
- Madera 21. (27 de Septiembre de 2018). Por qué Madera. Obtenido de http://www.madera21.cl/?page_id=2757
- MINVU. (2018). Ordenanza general de urbanismo y construcciones. OGUC. Chile.
- National Design Specification for Wood Construction. (2018). NDS. USA.
- ONDAC. (Junio de 2019). Manual de precios materiales, análisis y presupuestos de obra. Obtenido de <https://manual.ondac.com/cl/>
- Pérez, E., et al. (2017). Caracterización mecánica y comportamiento histerético de paneles de CLT elaborados en Chile con pino radiata, Santiago, Chile.
- Simpon Strong-Tie (2018). Cross Laminated And Glulam Timber Connectors. England.



NUEVA SEDE DEL LABORATORIO DE PRODUCTOS FORESTALES

NEW HEADQUARTERS OF THE FOREST PRODUCTS LABORATORY

Manavella, Cecilia ^{(1)*}; Valle, Ivan M.R. do ⁽²⁾

⁽¹⁾ Arquitecta. Servicio Forestal Brasileño. Brasília, Brasil

⁽²⁾ Dr. Arquitecto. Facultad de Arquitectura e Urbanismo. Universidad de Brasília. Brasília, Brasil

* Contacto: cecilia.manavella@florestal.gov.br

Resumen

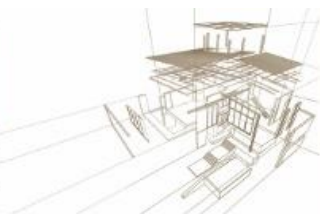
El Laboratorio de Productos Forestales - LPF, vinculado al Servicio Forestal Brasileño, en Brasilia, es un centro público de investigación sobre madera, creado en 1973, que desarrolla estudios para la utilización sostenible de recursos forestales. Considerando que los edificios existentes poseen más de 30 años, es necesaria su reformulación para adecuarlo a las demandas actuales y consolidarlo como centro de referencia nacional en investigación de maderas tropicales. A partir de estudios del sitio, de referenciales teóricos y proyectuales, se establecieron el programa de necesidades y las directrices del proyecto arquitectónico del nuevo LPF. Los edificios propuestos presentan tres tipologías distintas, siendo la madera el material predominante. El edificio principal es la puerta de entrada para quien visita el LPF, posee sistema viga-columna en madera laminada encolada y losas de madera contralaminada. La carpintería es el lugar de llegada de maderas en grandes dimensiones que, después de procesadas, son encaminadas a las áreas de investigación; tijeras de madera maciza vencen un vano de 15 metros creando una amplia área libre para la disposición de la maquinaria. Los laboratorios cuentan con salas que requieren cuidados especiales en el control de temperatura, humedad e iluminación; las paredes, en *wood frame*, garantizan la flexibilidad deseada y facilitan el paso de las instalaciones. Combinando aspectos importantes de la arquitectura de laboratorio - seguridad, funcionalidad y flexibilidad - con las posibilidades formales, estructurales y constructivas de la madera, el proyecto para el nuevo LPF pretende ser un demostrativo del potencial de su propio objeto de estudio.

Palabras-clave: arquitectura en madera; sistemas constructivos en madera.

Abstract

The Forest Products Laboratory – LPF of the Brazilian Forest Service, located in Brasília, is a public wood research center, created in 1973, which develops studies for the sustainable use of forest resources. Considering that the existing buildings have more than 30 years, it is necessary to reformulate it to adapt it to the current demands and to consolidate it as a national reference center in tropical wood research. The program and the guidelines for the architectural design of the new LPF complex were established based on site studies, theoretical and project references. The proposed buildings have three distinct typologies, being wood the predominant material. The main building is the entrance for those who visit the LPF, has column and beam system in glued laminated timber and slabs of cross laminated timber - CLT. The carpentry is the place of arrival of large wood pieces that, after being processed, are sent to the research areas; timber trusses span 15-meter creating a large free area for the machinery and material depot. The laboratories have rooms that require special care in controlling temperature, humidity and lighting; the walls, in wood frame, guarantee the desired flexibility and facilitate the passage of installations. Combining important aspects of laboratory architecture - safety, functionality and flexibility - with the formal, structural and constructive possibilities of wood, the project for the new LPF aims to be a demonstration of the potential of its own object of study.

Keywords: timber architecture; structural wood systems.



1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Productos Forestales - LPF, vinculado al Servicio Forestal Brasileño, es un centro público de investigación en madera que desde su creación, en 1973, ha estado desarrollando estudios para el uso sostenible de los recursos forestales.

Considerando que los edificios existentes poseen más de 30 años, es necesaria su reformulación para adecuarlo a las demandas actuales y consolidarlo como centro de referencia nacional en investigación de maderas tropicales.

Ubicado en Brasilia, LPF es uno de los pocos centros especializados en tecnología de productos forestales en Brasil (Gouveia and Martins 2014). A pesar del gran potencial forestal brasileño, las especies aún están poco estudiadas, lo que hace que la investigación sea extremadamente importante para el avance del uso de la madera y sus derivados en el país.

La madera tiene varias ventajas sobre otros materiales de construcción: es un recurso renovable y biodegradable, tiene un buen equilibrio entre peso y resistencia mecánica. El uso de la madera en la construcción civil contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Puede ser utilizada para diversos fines: temporales, permanentes y componentes de construcción, y en diversas formas: maciza, en láminas y en compuestos (Mello 2007).

La madera también permite una variedad de sistemas estructurales (viga-columna, *wood frame*, madera contralaminada) y se usa ampliamente en la estructura de la cubierta, lo que permite una gran diversidad plástica mediante el uso de armaduras, tijeras, pórticos, arcos. En estos casos, además de cumplir con la función estructural, también se pueden configurar como elementos llamativos de la estética arquitectónica.

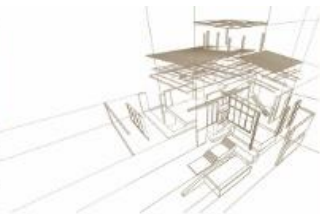
Por otra parte, se entiende que en el proceso de planificación de edificios con fines de laboratorio, el espacio físico es un aspecto importante, ya que contribuye tanto a la confiabilidad de los resultados de las pruebas realizadas, como a la protección de la salud humana y el medio ambiente. Por lo tanto, la organización funcional, la flexibilidad y la ubicación de las áreas laborales en relación con otras instalaciones dentro del mismo edificio son requisitos importantes a tener en cuenta en la arquitectura de laboratorio (Oliveira and Cardoso 2008).

Basado en la información presentada, este trabajo tuvo como objetivo elaborar el proyecto arquitectónico para la nueva sede de la LPF.

2. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo incluyó investigación bibliográfica, recopilación de información sobre el terreno, documentación de agencias gubernamentales existentes y reuniones con investigadores y personal de LPF.

Para la caracterización del sitio se llevaron a cabo: levantamiento de información sobre el sitio - sistema de carreteras, accesos, vegetación y edificios existentes; estudio de las condiciones climáticas, estudio de la documentación disponible en el Servicio Forestal de Brasil, como plantas y topografía; y levantamiento de la legislación pertinente.



Sobre la base de referencias teóricas e intelectuales, el programa de necesidades se estableció junto con los responsables de cada área del laboratorio, a través de reuniones presenciales.

Luego, se definieron las directrices proyectivas y desde allí se desarrolló el proyecto arquitectónico, que se discutió durante todo el proceso a través de reuniones con los miembros del equipo.

3. RESULTADOS

3.1. Programa de necesidades y directrices proyectivas

El programa de necesidades totaliza 2.840 m², siendo el 65% de áreas de laboratorio, el 15% de oficinas, el 5% de servicios (despensa y baños) y el 15% de áreas destinadas al público externo, como la biblioteca, el auditorio y la exposición.

Se establecieron cuatro directrices proyectivas. La primera está relacionada con la integración y la comunicación, considerando que las diversas áreas de LPF tienen sus especificidades, pero la integración e interacción entre los investigadores es fundamental para el desarrollo de la investigación. En este sentido, es necesario diseñar ambientes apropiados para cada sector, así como espacios habitables que tengan unidad y promuevan un buen flujo de personas y materiales en todo el complejo.

La segunda se refiere a las visitas y la difusión, ya que además del trabajo de investigación, el LPF recibe visitas y ofrece cursos para audiencias externas. Hoy en día, los ambientes de laboratorio son los mismos que los de visita y, a menudo, implican contacto directo con materiales y equipos peligrosos o con ensayos en curso. Es necesario diseñar espacios adecuados para la difusión y capacitación y regular el acceso de visitantes, garantizando la seguridad de los investigadores y el público externo.

Incorporar estrategias bioclimáticas fue la tercera directriz definida, ya que algunos espacios de laboratorio requieren condiciones de temperatura y humedad estrictamente controladas, mientras que otros permiten una mayor flexibilidad. Por lo tanto, se pretende garantizar la eficiencia energética en los espacios proyectados, con el uso de ventilación e iluminación natural, orientación adecuada de la fachada, protección de aberturas en fachadas con mayor insolación y mantenimiento de la vegetación existente.

Finalmente, la cuarta directriz es la promoción de la madera. Además de la funcionalidad y la calidad ambiental del proyecto, este debe promover y difundir el uso de la madera en los edificios, utilizando los diversos sistemas estructurales y de construcción, tales como *wood frame*, madera laminada encolada, madera contralaminada, viga-columna, entre otros.

3.2. Implantación

Actualmente, el complejo LPF tiene 7 edificios (Figura 1A), algunos de los cuales no satisfacen las demandas actuales y otros están en buenas condiciones. La primera propuesta es la demolición de cinco edificios y el mantenimiento de dos (Figura 1B). También se propone rediseñar las vías internas, con la creación de una nueva área de

estacionamiento y un nuevo acceso al lote (Figura 1C) y la construcción de 4 nuevos edificios (Figura 1D).

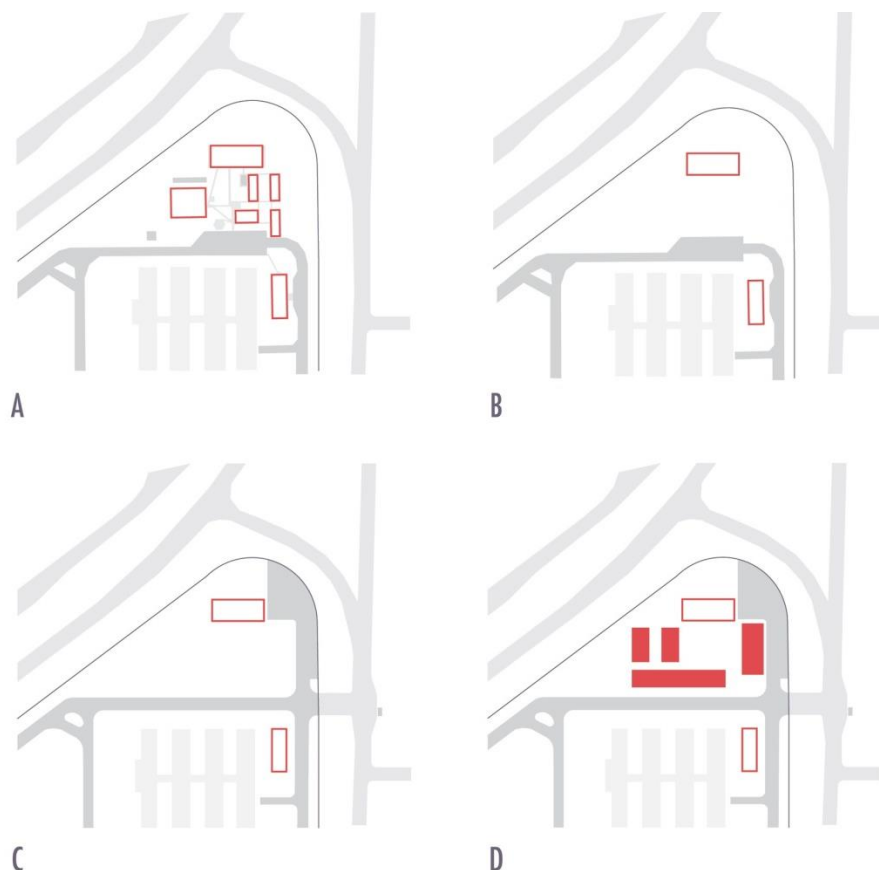


Figura 1: Esquema de cambios propuestos en el área de intervención. (A) situación actual; (B) demolición de 5 edificios y mantenimiento de 2 edificios en buen estado; (C) creación de nuevo acceso al lote y nueva área de estacionamiento; (D) construcción de 4 nuevos edificios.

La Figura 2 presenta con más detalle la implantación, las nuevas construcciones crean una plaza interior arbolada y más reservada que conecta los edificios y promueve un buen flujo de personas en todo el complejo.

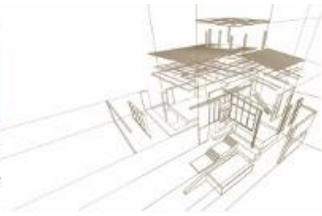


Figura 2: Implantación. Leyenda: A-edificio principal; B-laboratorios; C-carpintería; D- edificios existentes

3.3. Edificios

Las nuevos edificios presentan tres tipologías distintas (Figura 3) y el material predominante es la madera, en sus diversos usos, formas y sistemas estructurales.



Figura 3: Vista frontal. Laboratorios (izquierda), edificio principal (centro) y carpintería (derecha).

3.3.1. Edificio Principal

El edificio principal (Figura 4) es la puerta de entrada para quienes visitan el Laboratorio de Productos Forestales y concentra el programa dirigido al público externo. Cuenta con una gran área de exhibición, auditorio y biblioteca. Desde aquí, el visitante tiene acceso a la plaza interior y otras áreas del laboratorio.



Figura 4: Vista del edificio principal, fachada frente a la vía.

Al lado de la fachada que da a la plaza interior hay una pasarela, estructurada con pilares compuestos de madera laminada encolada, que conecta todos los edificios nuevos en el complejo (Figura 5).



Figura 5: Vista de la fachada del edificio principal frente a la plaza interior (derecha), la pasarela y la carpintería (en el fondo).

La estructura de la cubierta del edificio principal es compuesta de pilares “árbol” y vigas de madera laminada encolada. Paneles de madera contralaminada se utilizan en paredes y losas (Figura 6).

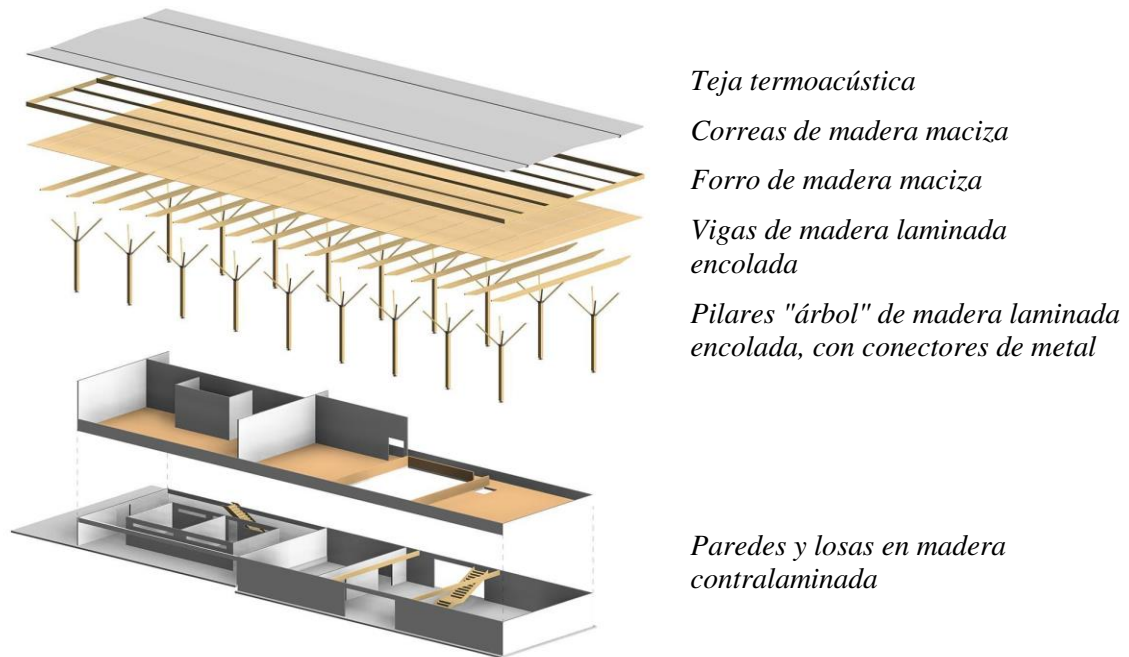


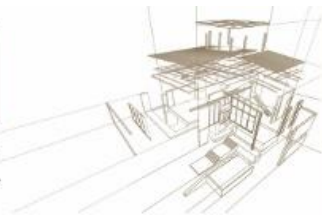
Figura 5: Diagrama estructural del edificio principal.

3.3.2. Carpintería

La carpintería (Figura 7) es el lugar de llegada de maderas en grandes dimensiones que, después de procesadas, son encaminadas a las áreas de investigación.



Figura 7: Vista de la carpintería, fachada frente a la vía.



En este edificio, tijeras de madera maciza, apoyadas en pilares de madera laminada encolada, vencen un vano de 15 metros creando una amplia área libre para la disposición de la maquinaria e almacenamiento de madera. Posse también salas más pequeñas para actividades específicas como pintura y soldadura, donde se utilizan paneles de madera contralaminada en paredes y losas (Figura 8).

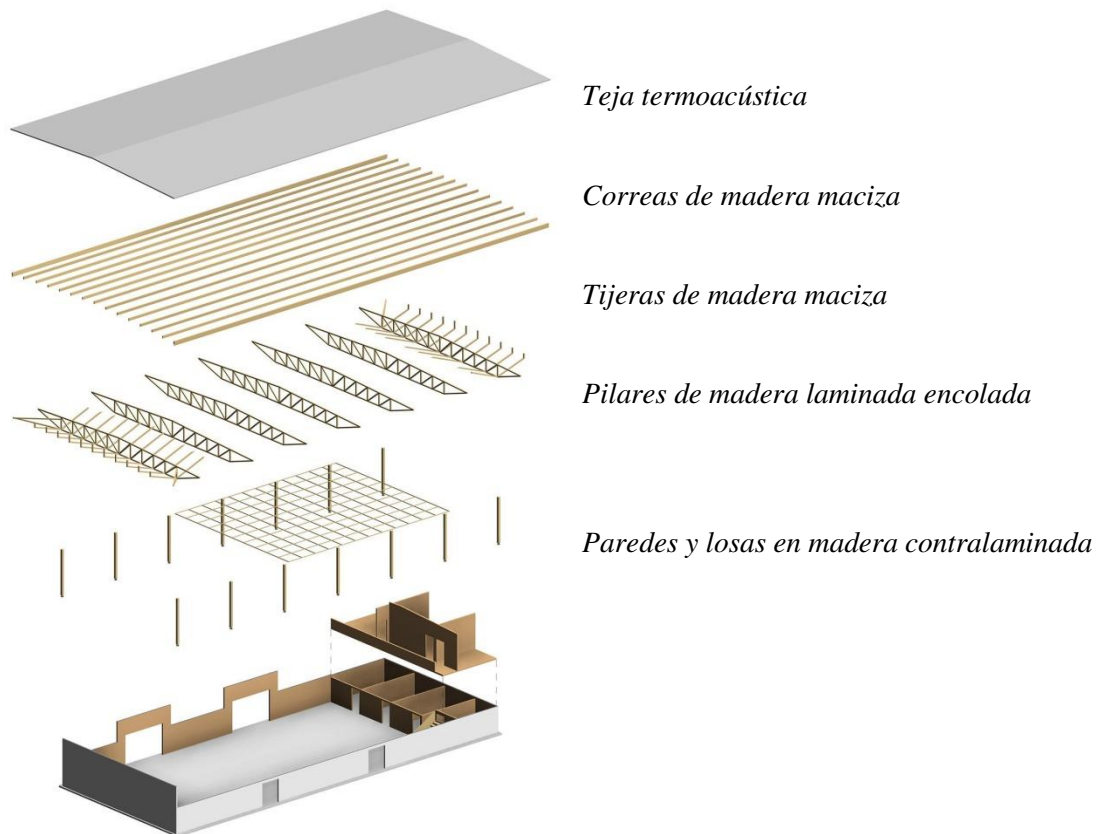


Figura 8: Diagrama estructural de la carpintería

En la carpintería, la madera también se utiliza en elementos no estructurales, como en las persianas de la fachada que recibe la mayor insolación y en el cierre de los aleros (Figura 9).



Figura 9: Vista de la fachada de la carpintería frente a la plaza interior (derecha) y el edificio existente (fondo).

3.3.3. Laboratorios

Los laboratorios son áreas con acceso restringido al personal de LPF y eventualmente a otros investigadores y visitantes (Figura 10). Cuenta con espacios que requieren un cuidado especial en el control de temperatura, humedad e iluminación.



Figura 10: Vista dos laboratórios

Possui sistema estrutural pilar-viga, todo em madeira laminada colada, e las paredes, em *wood frame*, garantizan la flexibilidad deseada y facilitan el paso de las instalaciones (Figura 11).

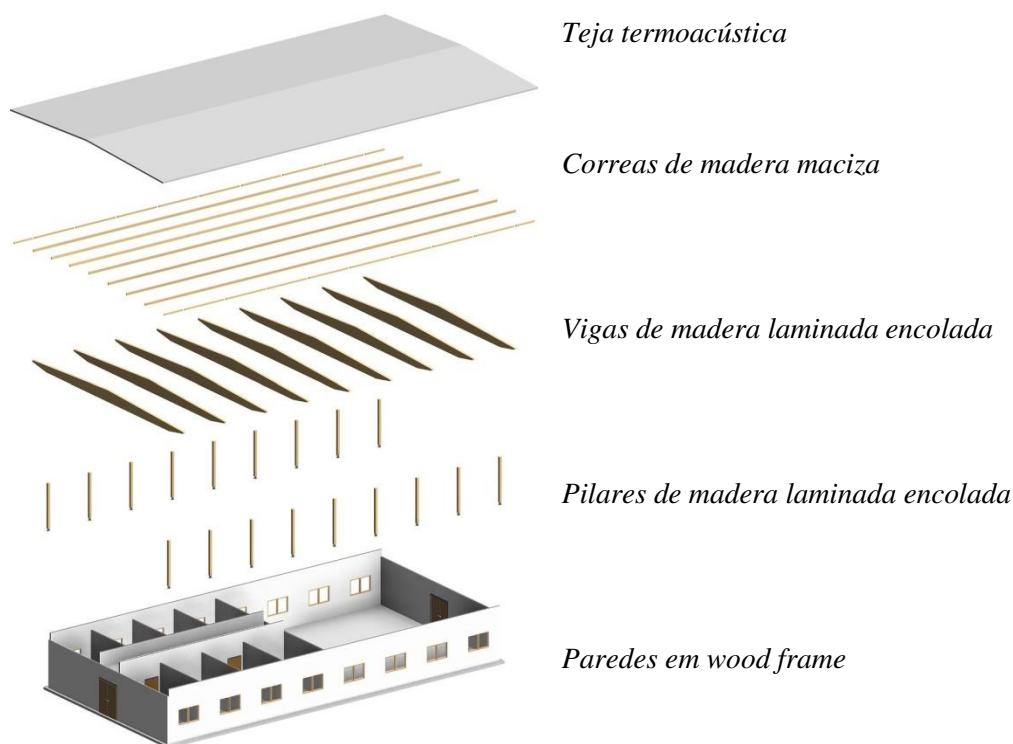


Figura 11: Diagrama de estructura de los laboratorios.

4. CONCLUSIONES

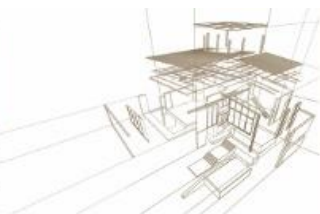
Combinando aspectos importantes de la arquitectura de laboratorio - seguridad, funcionalidad y flexibilidad - con las posibilidades formales, estructurales y constructivas de la madera, el proyecto para la nueva sede del Laboratorio de Productos Forestales pretende ser un demostrativo del potencial de su propio objeto de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOUVEIA, F. N. and MARTINS, H. F (2014). Laboratório de Produtos Florestais, uma nova perspectiva. Brasília: Enap, 19p.

MELLO, R. L (2007). Projetar em madeira: uma nova abordagem. Dissertação de mestrado Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

OLIVEIRA, T. A. ; CARDOSO, C. M. S. (2008). Biossegurança e arquitetura em laboratórios de saúde pública . In Póis, v.15, n.24. p. 108-124.



VIVIENDA SOCIAL SUSTENTABLE CON ESTRUCTURA LIVIANA DE MADERA APLICANDO MATERIALES Y ELEMENTOS DE INNOVACIÓN

SUSTAINABLE SOCIAL HOUSING WITH TIMBER LIGHT FRAME APPLYING INNOVATION MATERIALS AND ELEMENTS

Burgos, Camila; González, Paulina*; Pérez, Eduardo; Ampuero, Leandro; Rivera, Luis
Universidad de Santiago de Chile, Chile

*Contacto: paulina.gonzalez@usach.cl

Resumen

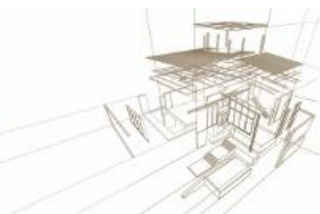
Se propone el diseño de una vivienda social sustentable de 55 m² que contempla una torre evaporativa convectiva orientada al norte para resolver las problemáticas de climatización, medioambientales, con un aislante de lignocelulosa, y tecnológico, empleando un robot para el mantenimiento de paneles. El diseño arquitectónico es sencillo y recoge dos conceptos del diseño bioclimático; el primero es la orientación al norte de los espacios más relevantes, dejando las zonas húmedas hacia el sur; el segundo es el movimiento convectivo del aire en la torre, ubicando los dormitorios (2 piso) para aprovechar mejor el calor durante la noche. Se optimizan los flujos de ventilación natural utilizando el espacio de circulación vertical y una envolvente térmica de alta eficiencia, conformada por una estructura liviana de marcos de madera rellena con aislante de lignocelulosa de material 100% reciclado. Éste se complementa con un tabique con cámara de aire no ventilada en su interior, para aumentar la resistencia térmica del muro y distribuir los ductos de la vivienda para controlar la hermeticidad de la envolvente térmica hacia el exterior. La vivienda cuenta con termo solar y termo eléctrico para la demanda de agua caliente sanitaria, un sistema de 1 KW de paneles fotovoltaicos on grid para la demanda eléctrica y un robot de limpieza de paneles que permite aumentar en un 20% el rendimiento de este dispositivo.

Palabras-clave: vivienda social sustentable, innovación, envolvente térmica.

Abstract

In this work a design of a sustainable 55 m² social housing is proposed, it considers a convective vaporizing tower pointed to the north to solve climate control, and environmental problems, with an insulation of lignocellulose and technological, using a robot for the maintenance of solar panels. Architectural design is simple and picks up two concepts of bioclimatic design; the first is pointing to the north the most relevant spaces, leaving wet zones to the south; the second is the convective movement of the air in the tower, locating bedrooms (2 floor) for the best profit of heat at night. Natural ventilation flows are optimised using the vertical circulation space and a thermal, highly efficient surrounding is proposed, made of a light structure of wooden frames filled with lignocellulose of 100% recycled material. This is complemented adding a partition wall which has a non-ventilated air chamber in its inside, for increase thermal resistance of the wall and distribution of the house's ducts, the hermetic of thermal envelope to the outside may be controlled. The house has solar heater and electric heater for the demand of hot sanitary water, 1 KW of photovoltaic panels on grid for the electricity demand and cleaning robot for panels which allows an increase of 20% efficiency of this device.

Keywords: sustainable social housing, innovation, thermal envelope.



1. INTRODUCCIÓN

El déficit habitacional en Chile, según el Censo del 2017, es de 393.613 viviendas, el cual se pretende reducir a no más 150 mil para el año 2022. Sin embargo, y aunque se aprecie un cambio positivo a través de los años, el común de los chilenos se muestra disconforme en su apreciación de la vivienda social típica debido a las malas experiencias que han afectado a familias vulnerables, producto de una mala ejecución de las obras.

Es importante introducir criterios de sustentabilidad a la vivienda social de nuestro país en el marco del impacto ambiental de la industria de la construcción; asimismo, se espera cambiar la imagen deficiente que existe respecto de la vivienda social típica por una de alto estándar. En virtud de este desafío, se propone el diseño de una vivienda social sustentable para el concurso chileno Construye Solar 2019; el cual corresponde a un sistema constructivo modular con elementos sustentables y de innovación, que contempla un robot de limpieza de paneles solares, una torre evaporativa y un material termo-aislante a base de aglomerado de ligno celulosa 100% reciclada.

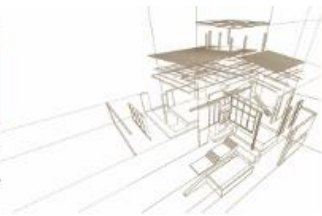
El sistema constructivo está conformado por marcos de madera de 45 x 190mm que proporcionan la resistencia estructural a los muros, y que contiene el material aislante en su interior (190 mm). Para rigidizar el conjunto, se propone la utilización de tableros de contrachapado estructural de 15 mm de espesor, en ambas caras del marco, generando de esta manera un panel con espacio en su interior para el material aislante. Los tableros de contrachapado estructural se encuentran en un formato de dimensiones 1,22 m x 2,44 m; sin embargo, se ha decidido diseñar un panel de 1,2 m x 2,4 m para mantener la cuadrícula, por lo tanto es necesario rectificar las dimensiones de los tableros estándar.

La modulación y estandarización de la vivienda facilita un montaje de rápida ejecución, permitiendo la industrialización y la construcción en seco. Además de incluir elementos de innovación a un valor accesible para una vivienda social. El sistema que se propone permite promover la utilización de la madera como material constructivo sustentable, lo que resulta trascendental en el contexto de la importancia que tiene hoy el cuidado del medioambiente.

2. PROYECTO VIVIENDA SOCIAL SUSTENTABLE

El diseño corresponde al de una vivienda unifamiliar, de agrupamiento continuo y con una superficie total de ambas plantas de 55.12 m². La distribución interior de la vivienda presenta dos particularidades: en la planta baja los espacios son más amplios y flexibles que en la planta alta y de compartimiento familiar. Para el caso de la planta alta, resalta el uso individual y privado de la vivienda.

Por otra parte, la vivienda privilegia una distribución espacial interior que permite orientar hacia el norte los recintos más importantes (estar y comedor en el primer piso, y dormitorios en el segundo piso), implementando en dichos recintos, ventanas de mayor tamaño para el aprovechamiento de ganancias solares directas que ayuden a calefaccionar la vivienda de forma pasiva, mientras que la orientación sur de los



recintos de servicio permiten disminuir la dimensión de ventanas, reduciendo también las pérdidas de energía en invierno.

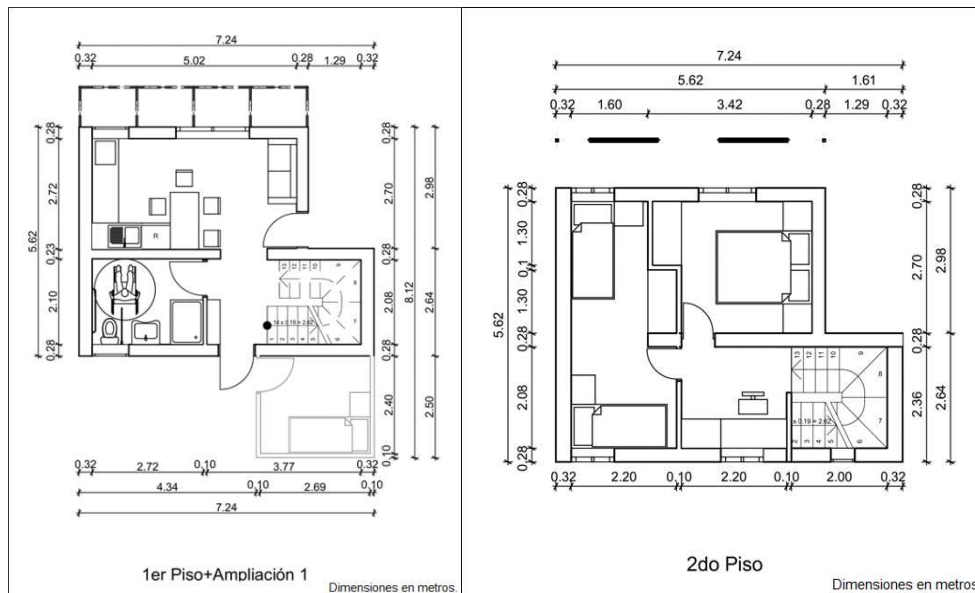


Figura 1: Plantas de vivienda social sustentable. (Toloza 2018).

En lo que se refiere a elementos de innovación, el prototipo de vivienda, además del material termo-aislante de ligno celulosa 100% reciclado, cuenta con una torre evaporativa convectiva, ubicada en el espacio de la escalera que permite hacer operativas las estrategias bioclimáticas, la que actúa como chimenea de ventilación en épocas de invierno e intermedias, y a su vez funciona como torre de refrigeración evaporativa de flujo descendente en épocas de verano con temperaturas extremas; esta estructura proporciona además una cubierta inclinada para la incorporación de celdas fotovoltaicas, para las cuales se contempla el diseño de un robot de limpieza que permite maximizar su eficiencia.

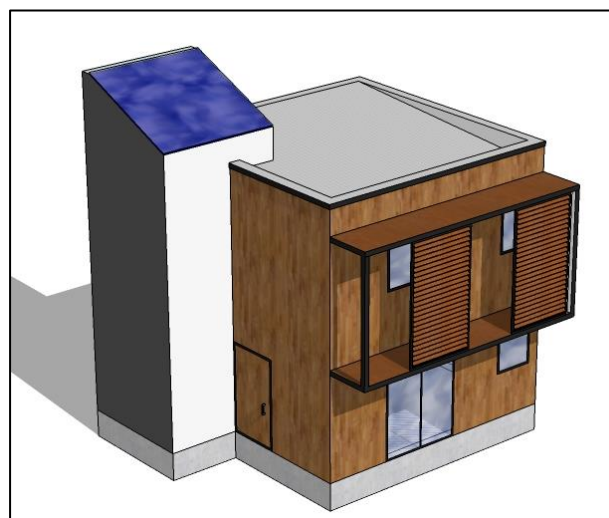
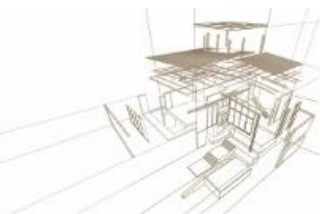


Figura 2: Isométrica de vivienda social sustentable. (Toloza 2018).



Además, se dispone de 1KW fotovoltáicos on grid para la demanda de electricidad, un termo solar de 200 litros y un termo eléctrico de 100 litros para el agua caliente sanitaria.

3. DISEÑO CONSTRUCTIVO

El concepto del diseño estructural y constructivo de la vivienda está basado en el empleo de materiales sustentables capaces de solventar las solicitudes requeridas; entonces, se utiliza madera para la estructura y materiales reciclados para resolver los aspectos relativos a aislación térmica y acústica. La estructura se materializa con muros perimetrales conformados por paneles modulares industrializables, que se componen de un marco de madera, revestido por ambas caras con tableros de contrachapado estructural de 15 mm, relleno con material reciclado lignocelulósico, el cual provee de excelentes propiedades térmicas a la envolvente de la vivienda.

La planta de arquitectura se proyecta en una cuadrícula de 1,2 m x 1,2 m, debido a que los elementos de construcción tipo panel se encuentran en formatos con esas dimensiones, de esta manera disminuye la generación de residuos.

3.1. Estructura de la vivienda

Los muros de la vivienda están conformados por paneles modulares de 1,2m de base por 2,4 m de altura, los cuales se elaboran con piezas de madera aserrada seca de 45 mm x 190 mm (INN 2004) y tableros de contrachapado estructural de 15 mm de espesor en ambas caras del panel, como se muestra en la Figura 1; se establece una altura de 2,4 m en atención a que la altura mínima, de piso a cielo terminado, que establece la OGUC (MINVU 2016) para recintos habitables es de 2,3 m. Los tableros de distintos materiales de construcción que están disponibles son de 1.22 x 2.44 m; sin embargo el panel base de la solución habitacional que se propone es de 1,2 m x 2,4 m, para mantener la cuadrícula. También se emplea un medio panel, con dimensiones 60 cm x 240 cm x 23,6 cm de espesor para los antepechos. En el interior de los paneles se dispone el material aislante de ligno celulosa.

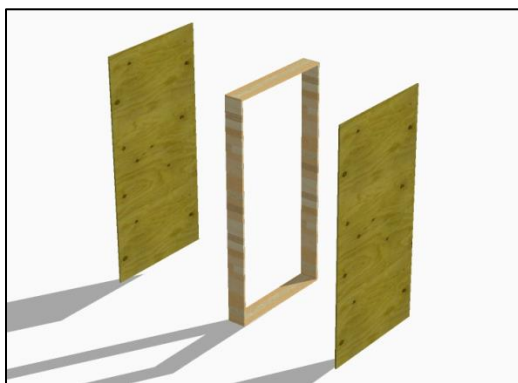


Figura 3: Estructura básica del panel. (Tolozá 2018).



Los paneles se montan sobre soleras de 50 mm x 200 mm ancladas al sobrecimiento y posteriormente se refuerza el conjunto con soleras superiores de 50 mm x 200 mm. Los vanos se refuerzan perimetralmente con un marco de madera elaborado con piezas de 25mm x 200 mm, que se fija por medio de tornillos a los tableros de contrachapado estructural.

El envigado de entrepiso se materializa con vigas de pino dimensionado de 50 mm x 200 mm y 281 cm de longitud, dispuestas cada 60 cm, las cuales se apoyan sobre las soleras superiores de los paneles del primer piso. Sobre las vigas de entrepiso se instalan tableros de contrachapado estructural de 18 mm y en la parte inferior un tablero de OSB de 9 mm y paneles de yeso cartón de 10 mm de espesor. En el espacio interior que se genera en el entrepiso se disponen 20 cm de material lingo-celulósico para aislación térmica. Además, sobre el contrachapado que conforma el piso del segundo piso, se contempla una lámina de caucho reciclado de 5 mm para disponer de aislación acústica y sobre éste se propone la instalación de piso laminado de 6 mm.

Los paneles de muro del segundo piso se instalan sobre soleras de 50 mm x 200 mm, las cuales se anclan al envigado del entrepiso.

La estructura de techumbre está constituida por cerchas de madera aserrada, de 25 mm x 200 mm distanciadas a 60 cm, las cuales se fijan a los muros por medio de herrajes y omegas estructurales de acero galvanizado de 25 x 40 x 15 x 8 x 0.85 mm. Sobre éstas se fijan tableros de OSB de 11.1 mm para soportar la cubierta de acero galvanizado 5V. En el entretecho se dispone lana mineral de 10 cm para aislación térmica.

La envolvente de la vivienda se materializa en su mayor parte con paneles modulares con el objetivo de generar el menor número posible de piezas especiales, las cuales se presentan principalmente en la techumbre de la torre de climatización, debido a su geometría que ha sido definida para facilitar la instalación de paneles fotovoltaicos.

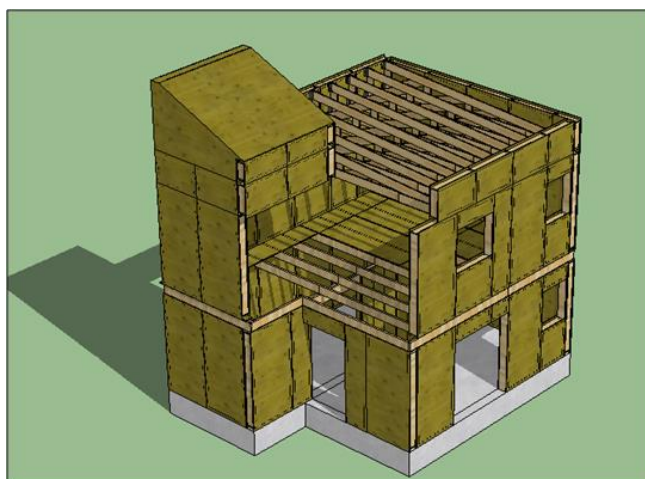
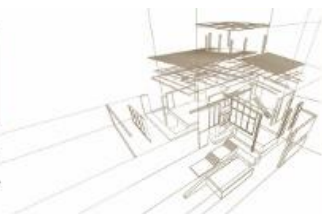


Figura 4: Esquema estructural de la vivienda. (Tolozá 2018).

3.2. Material de ligno celulosa reciclada

El material utilizado como aislante es un aglomerado de lingo celulosa, elaborado a partir de bandejas de huevo (Villanueva 2017), cuya finalidad es proponer un elemento



que cumpla con las normativas nacionales para ser empleado en viviendas sociales. Su utilización permite reciclar y revalorizar material de desecho. Es un material ecológico que presenta un bajo impacto ambiental, es higroscópico, de color grisáceo, se asemeja bastante visualmente a una superficie de hormigón, pero significativamente más ligero. Este material debe ser vertido en estado plástico dentro de un molde y secado a temperatura controlada. En la Figura 5 se muestran bloques de este material.

Otra de las características de este material es su baja conductividad térmica (λ) de aproximadamente 0,144 W/(mK), inferior a la de materiales utilizados en la construcción como el hormigón armado (1,63 W/mK) o el ladrillo cerámico (0,5 W/(mK)); se asemeja más a maderas densas como el roble o el coigüe (0,157 W/mK, 0,145 W/mK).



Figura 5: Bloque de ligno celulosa. (Villanueva 2017)

3.3. Incorporación material aislante y montaje de paneles

3.3.1. Incorporación del material aislante en los módulos

Para la incorporación del material aislante de ligno celulosa se proponen dos opciones:

- a) Elaborar un bloque macizo, mediante el proceso de secado controlado en horno eléctrico, y posterior mecanizado para la obtención de un prisma rectangular; a éste proceso se puede agregar una etapa de fresado para obtener un bloque machihembrado, con el fin de obtener mayor grado de hermeticidad. Estos bloques se disponen al interior del panel, como se muestra en la Figura 6 y luego se sellan las juntas con un adhesivo.

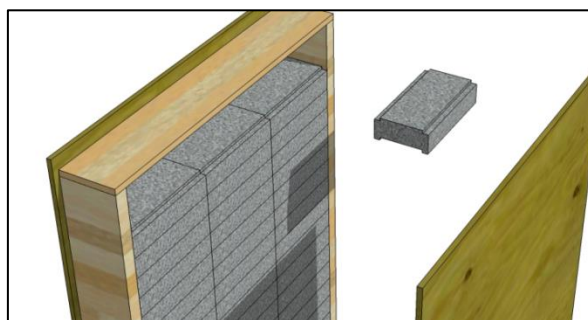
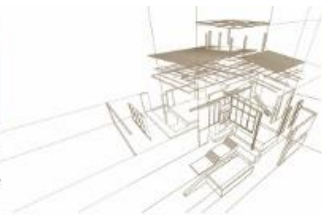


Figura 6: Incorporación de bloques de ligno celulosa al módulo. (Tolosa 2018).



Los principales inconvenientes de utilizar el formato de bloques, es que se requiere un gran volumen de material para hornear, un gran número de bloques a mecanizar y una gran variedad de geometrías de bloques. Para lograr una adecuada hermeticidad, se requiere aplicar adhesivo para sellar las uniones, tanto entre bloques, como entre los bloques y el marco de madera.

- b) Incorporar el material de ligno celulosa por medio de vaciado dentro del módulo como molde definitivo para la contención del aglomerado de ligno celulosa, según se muestra en la Figura 7. Se considera que es la alternativa más conveniente, debido a que el aglomerado presenta buena capacidad de adherencia a superficies porosas en su estado plástico, de esta manera se obtiene un sello hermético entre el aislante y el marco del panel, y un volumen macizo del material.

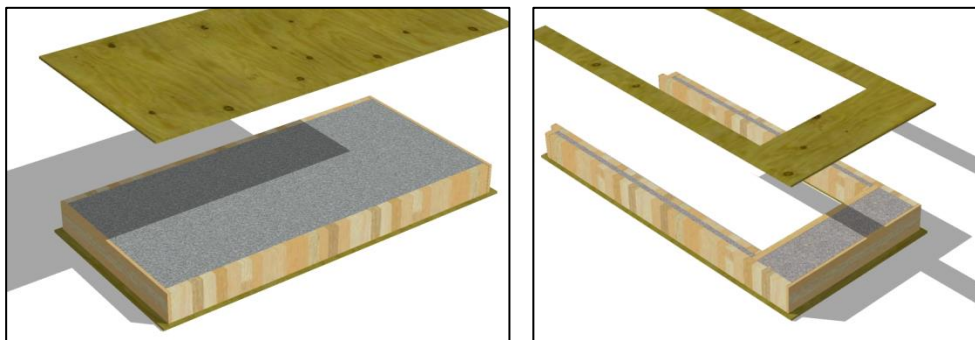


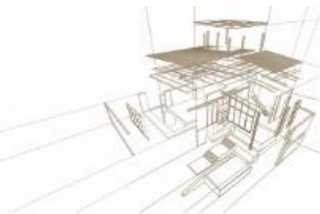
Figura 7: Incorporación de bloques de ligno celulosa al módulo. (Toloza 2018).

3.3.2. Montaje de paneles

- a) Primera etapa del montaje: en primer lugar, se efectúa el trazado de la disposición de los paneles y se instala un fieltro asfáltico en todo el recorrido de los muros; sobre el fieltro se instalan las soleras inferiores de los muros dejando un margen al borde del sobrecimiento de aproximadamente 15 mm para permitir la instalación de un recubrimiento que asegure un adecuado escurrimiento de las aguas. Luego se instalan los paneles sobre las soleras ya ancladas, con apoyo de puntales provisionarios, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8: Montaje del panel sobre la solera inferior. (Toloza 2018).



- b) Montaje unión en línea: el ensamble de dos o más paneles en línea se realiza por medio de una pieza de madera de 45 mm x 190 mm x 2,31 m, dispuesta como pie derecho entre ambos paneles, lo cual puede apreciarse en la Figura 9; el panel se fija con tornillos cada 20 cm, por ambas caras del panel, de tal forma que penetren por los cantos de la pieza de ensamble, posteriormente se acopla el segundo panel. Luego, se fija a la solera inferior asegurando verticalidad del elemento.

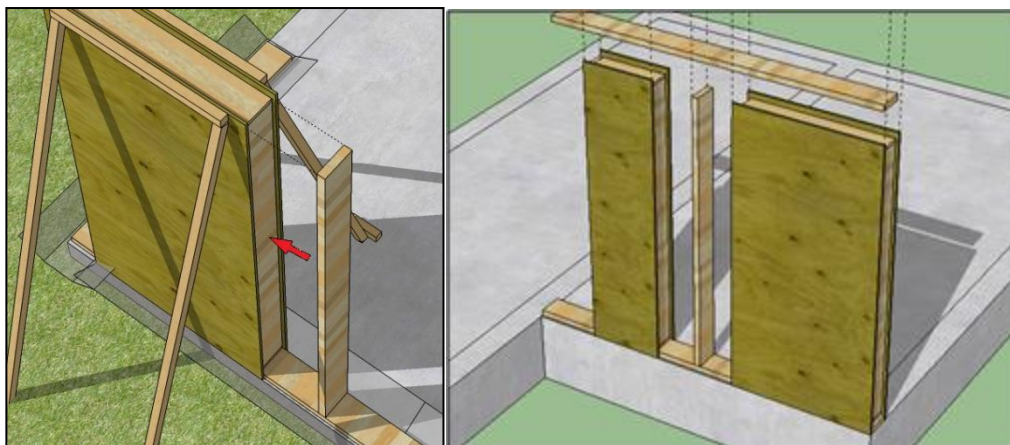


Figura 9: Ensamble de los paneles en unión en línea. (Toloza 2018).

- c) Montaje unión esquina: se realiza con una pieza de ensamble de madera de 21 mm x 190 mm x 2,31 m. En primer lugar, se debe fijar la pieza de ensamble en el panel cuyo canto queda expuesto una vez realizada la union; se debe dejar un margen de 15 mm desde el borde para dar lugar al tablero de contrachapado y márgenes de 45 mm desde el borde superior e inferior, para las soleras. Luego, se disponen tornillos cada 20 cm utilizando una configuración tipo zig-zag en la cara de la pieza de ensamble. En la Figura 10 se muestra esta configuración y en la Figura 11 se puede apreciar el montaje de la unión de paneles de esquina con vanos, el cual es similar al especificado en este párrafo.

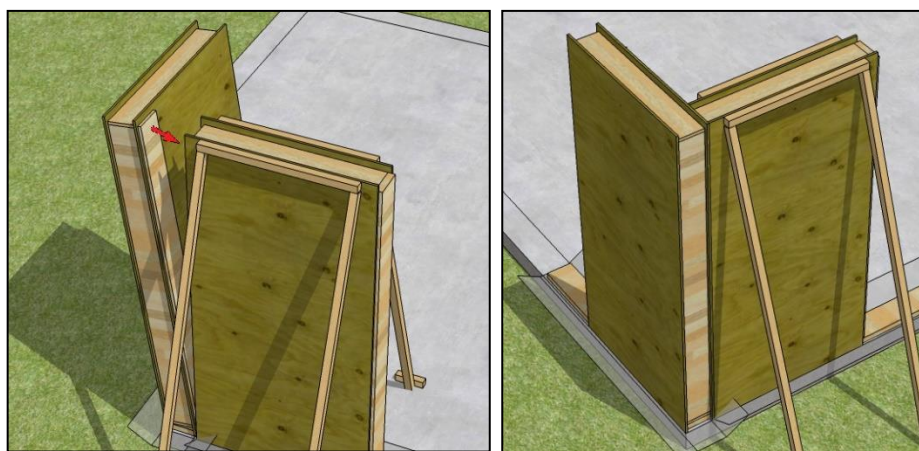


Figura 10: Unión y montaje de paneles de esquina. (Toloza 2018).

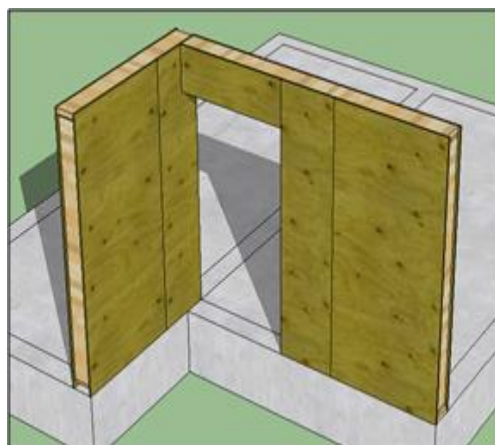


Figura 11: Montaje de paneles con vanos. (Toloza 2018).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el diseño de un prototipo de vivienda social sustentable, de bajo costo, utilizando la madera como principal material para la estructura y un aislante térmico obtenido del reciclaje de bandejas de empaque de huevos. La estructura del sistema constructivo es modular, de fácil y rápido montaje, de excelentes prestaciones, elaborada en base a madera, que es un material muy abundante en Chile.

El material termo-aislante es un aglomerado de ligno celulosa que aporta al desempeño energético de la vivienda y es de bajo impacto ambiental. A su vez otorga valor y disminuye la huella ecológica del residuo de bandejas de huevo, siendo 100% reciclada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo del Proyecto Casa Tecno de la Universidad de Santiago de Chile, para el concurso Construye Solar 2019.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2004). NCh 2824 of. 2004: Maderas – Pino radiata – Unidades Dimensiones y tolerancias.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2005). NCh 1207 Of. 2005: Pino radiata – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2007). NCh 853 Of. 2007: Acondicionamiento térmico-envolvente para edificios.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2008). NCh 850 Of. 2008: Aislación térmica - determinación de resistencia térmica en estado estacionario y propiedades relacionadas - aparato de placa caliente y de guarda.



INN (Instituto Nacional de Normalización) (2008). NCh 1079 Of. 2008: Arquitectura y construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.

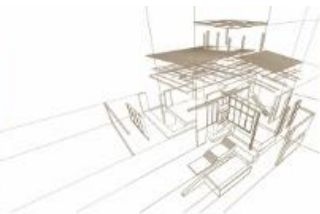
INN (Instituto Nacional de Normalización) (2012). NCh 819 Of. 2012: Madera preservada – Pino radiata – Clasificación según uso y riesgo en servicio y muestreo.

MINVU. Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y componentes de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2014.

MINVU (Ministerio de la Vivienda y Urbanismo). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones OGUC. 2016

Tolosa, E. (2018). Propuesta de sistema constructivo modular, con aislante térmico de material ecológico, para su utilización en vivienda social sustentable. Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Villanueva, G. (2017). Caracterización mecánica y térmica de un aglomerado de celulosa, una aplicación a la fabricación de un panel cuadrado para cielo falso y un ladrillo estructural. Memoria de título de Tecnólogo en Construcción. Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.



PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DEL MUSEO DEL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO ZONZAMAS

CONSTRUCTION AND REHABILITATION PROJECT OF THE MUSEUM OF THE ZONZAMAS ARCHAEOLOGICAL SITE

Vidovich, Francisco ^{(1) *}; González, Inés ⁽²⁾; Reina, Martín ⁽³⁾; Palerm, Blanca ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Ingeniero Civil. RDA ingeniería. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Arquitecta, RDA ingeniería. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾ Ingeniero Civil. RDA ingeniería. Montevideo, Uruguay

⁽⁴⁾ Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Fhecor Ingenieros consultores. Madrid, España

* Contacto: fvidovich@rdaingenieria.com

Resumen

Proyecto de rehabilitación de un parque arqueológico ubicado en Zonzamas, isla de Lanzarote, España. Consiste en la realización de una cubierta de 1650m² en la zona de un yacimiento arqueológico, y la generación de un espacio para la recepción de visitantes, exposición didáctica y servicios de 1050m².

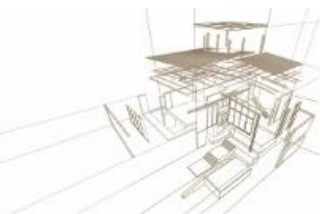
La propuesta implicó adoptar un criterio común en el tratamiento del yacimiento y de una edificación preexistente cuya obra fue paralizada hace 15 años, de tal manera que tanto los restos arqueológicos como el edificio queden “envueltos” por un sistema estructural de madera, modular, liviano y homogéneo. Un aspecto fundamental, es que se realizan cada año nuevas campañas de investigación y es altamente probable que se sigan encontrando restos, por esta razón la estructura debe ser de fácil crecimiento y las soluciones de apoyos no pueden ser invasivas. La solución estructural es modular de 3mx3m formadas por pilares, vigas principales y correas a dos niveles distintos formando un entresqueño con pasarelas peatonales y cubierta liviana de policarbonato. Para evitar apoyos de pilares sobre restos arqueológicos y sobre el edificio existente, se sustraen pilares y se colocan vigas atensoradas mixtas, compuestas por madera y acero, salvando luces de hasta 21m. La voluntad formal del uso de la madera por sus características de calidez y liviandad, implicaron un desafío importante, ya que, para cubrir los requisitos de resistencia y estabilidad, las dimensiones de algunos elementos resultaban de gran tamaño. Esto condicionó la solución, y determinó la utilización de un sistema mixto, con madera y acero.

Palabras-clave: Rehabilitación de parque arqueológico con sistema estructural en madera.

Abstract

Construction and rehabilitation project of an archeological park, located in Zonzamas, an island in Lanzarote, Spain. It consists of a new roof of 1650m² above an archeological site, and the creation of a new zone of 1050m² for the reception of visitors, a didactic exhibition and other services. The proposed solution required adopting common criteria in the management of the site and of the existing building whose construction was paralyzed 15 years ago, in order to surround both of them with a modular, light and uniform wooden structure. Taking into consideration that new research campaigns are carried out every year, and that new remains will probably be found, the structure must be easy to expand, and the foundations cannot be invasive. The structural solution consists of a series of 3mx3m modulus composed of columns, main beams and joists arranged in two levels, creating a mezzanine with pedestrian walkways and a lightweight polycarbonate roof. To avoid pillar supports above archaeological remains and the existing building, 21m spans are achieved with beams made out of wood and a steel reinforcement. The willingness of using wood for its characteristics of warmth and lightness, in addition to the great dimensions of some elements and spans, implied a tremendous challenge. This fact restricted the solution, and determined the use of a mixed system of wood and steel.

Keywords: Rehabilitation of an archeological park with wooden structural system.



1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo intenta mostrar el proyecto de rehabilitación y reacondicionamiento del Parque Arqueológico ubicado en Zonzamas, en la isla de Lanzarote, España. Consiste en la intervención de dos zonas; la realización de una cubierta de 1645m² en la zona de un yacimiento arqueológico para su visita y protección, y la generación de un espacio para la recepción de visitantes, exposición didáctica y servicios imprescindibles de 1030m², reutilizando una construcción que se comenzó a construir hace más de 20 años y quedó paralizada.

El proyecto original que se promovió hace años fue de gran envergadura para el lugar, del que sólo se llegó a construir parcialmente un módulo de servicios, que quedó paralizado en fase de estructuras hasta la fecha, por falta de recursos y por ser especialmente agresiva con las estructuras arqueológicas. Es una edificación muy singular, que forma parte de un proyecto excesivamente ambicioso, y que la propiedad decidió desechar.

El edificio existente, hoy abandonado se iba a dedicar al estudio e ilustración de la cultura de los Mahos, los primitivos habitantes de Lanzarote. Con el propósito de convivir con el delicado entorno, la asimétrica estructura del museo se hundía en la tierra, mientras que en la superficie aparecían grietas por las que penetraría la luz natural bañando las salas expositivas. En la zona norte se abriría un mirador sobre el mar de lava y la llanura de Zonzamas, [Figura 1](#).

Distintas campañas arqueológicas realizadas desde los años setenta del siglo pasado evidencian la gran extensión de este complejo, y que ocuparía más de diez hectáreas. Sobresalen una serie de estructuras excavadas en el subsuelo, de las que unas, las casas hondas, se utilizarían para vivir, mientras que otras pudieron ser posibles almacenes o graneros. El piso de las casas hondas se excavaba en la tierra, por lo que la mitad de la habitación quedaba por debajo del nivel del suelo y sólo sobresalía una parte de las paredes.

El objeto del encargo para el nuevo proyecto comprende la protección de las principales estructuras (conocidas hasta ahora) del yacimiento y la reutilización de la edificación que se empezó a construir para el proyecto original como “Museo de Sitio-Aula didáctica-Centro de visitantes”, un lugar para la recepción de visitantes, exposición didáctica y servicios imprescindibles.

El proyecto integral arroja unos 1.700 metros de infraestructura museística con una propuesta arquitectónica y paisajística, integrada y respetuosa con el espacio natural donde se encuentra, que no sólo pondrá en valor el yacimiento y los restos y estructuras arqueológicas que allí se encuentran, sino también contempla la creación de los itinerarios y la recuperación y adecuación de la edificación preexistente en el parque.

El proyecto de Museo de Sitio de la zona arqueológica de Zonzamas, en Lanzarote, se convertirá en un “proyecto vivo”, concebido para que la experiencia de los visitantes al mismo pueda ir variando en la medida que paralelamente a su apertura se continuarán desarrollando nuevas campañas de investigación y excavaciones, que podrían dar lugar

a nuevas estructuras y hallazgos arqueológicos a descubrir por los usuarios de este futuro museo de sitio.



Figura 66: Foto estructura de hormigón preexistente, sector Aula didáctica

2. METODOLOGÍA

La propuesta por parte de los arquitectos que desarrollaron el nuevo anteproyecto implicó adoptar un criterio común en el tratamiento del yacimiento propiamente dicho, como de la edificación preexistente, de tal manera que tanto las estructuras arqueológicas como el edificio queden “envueltos” por un sistema modular de estructura de madera y cubierta ligera de panel celular de policarbonato, solución que se prolonga también al cerramiento vertical de las fachadas del aula didáctica, dentro de la cual el edificio preexistente (una pieza escultórica de hormigón visto) se pueda entender como un “hallazgo” más.

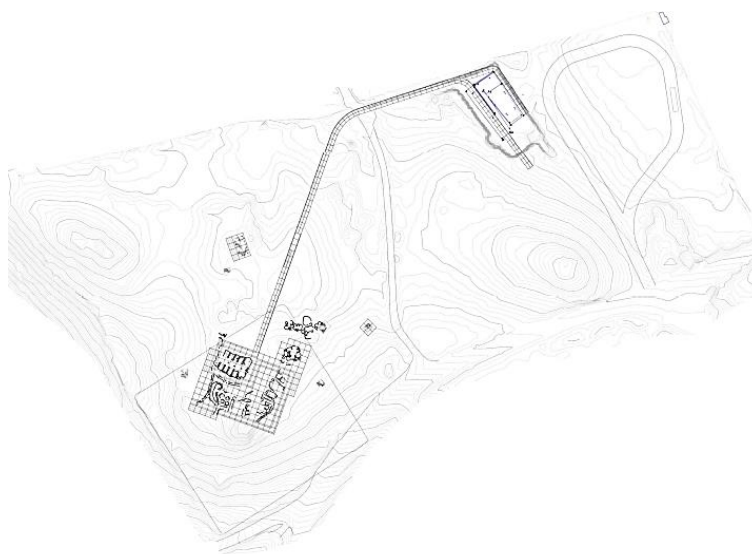
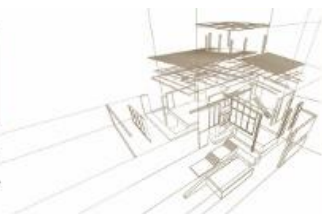


Figura 67: Layout general proyecto Arqueológico Zonzamas



El proyecto plantea una estructura modular con pilares compuestos, entre los que se disponen en ambos sentidos vigas de madera, tanto para generar el plano de suelo como para resolver la estructura de cubiertas, [Figura 3](#).

La idea sería que este módulo básico, pudiera servir de soporte a estructuras de mayor luz, (6-12-21 metros) para evitar apoyos sobre las estructuras arqueológicas, o cubrir el vano para albergar el edificio preexistente en el interior del aula didáctica-centro de visitantes.

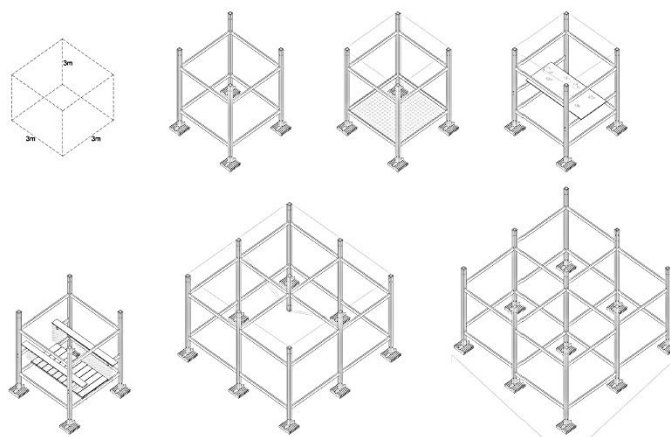


Figura 68: Módulo de estructura inicial

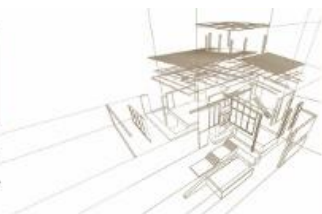
Un aspecto fundamental, es que se desconoce el ámbito del yacimiento, excepto las estructuras reflejadas en planta, por lo que se realizan cada año nuevas campañas de investigación y es altamente probable que se sigan encontrando restos. En ese sentido el proyecto desechado inicialmente por la municipalidad, era especialmente agresivo, y debemos actuar en sentido totalmente inverso, disponiendo soluciones de apoyo que no precisen afección al subsuelo.

Actualmente la zona arqueológica está compuesta por tres áreas, pero según vayan progresando los estudios arqueológicos estas podrán aumentarse. Por estas razones la estructura prevista es modulable y de fácil crecimiento.

3. DESARROLLO

La solución estructural para cubrir el yacimiento arqueológico se ha previsto de una estructura en base a módulos de 3m x 3m formados por pilares, entre los que se disponen en el plano de suelo vigas de madera formadas con escuadrías donde se colocan pasarelas peatonales con tarimas que apoyan en correas de madera, [Figura 4](#). A nivel de techo se opta por una cubierta liviana de panel celular de policarbonato con pendiente a dos aguas de 8%, apoyada en correas de madera separadas cada un metro que descargan en vigas principales.

Los pilares de madera nacen en fustes y zapatas de hormigón armado. Las zapatas se apoyan en el terreno evitando excavaciones que puedan alterar los restos arqueológicos.



La intención por nuestra parte es que la estructura de madera sea repetitiva y homogénea en escuadrías de madera.

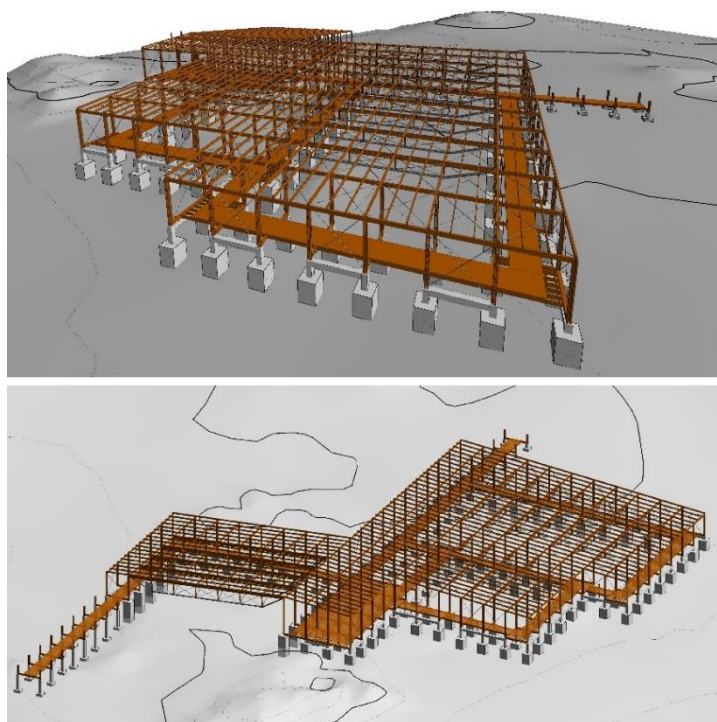
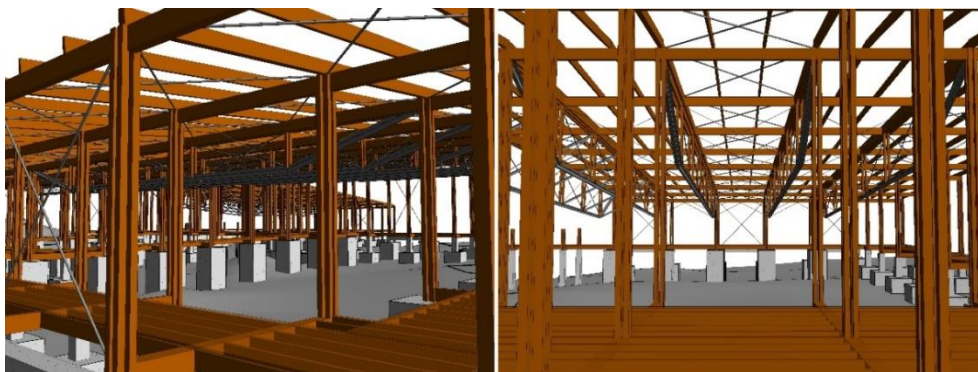


Figura 69: Modelo BIM estructura sector Parque

Para evitar el apoyo de pilares sobre restos arqueológicos hay zonas donde es necesario salvar luces de hasta 21 metros, donde se disponen vigas atensoradas mixtas, compuestas por madera y acero, [Figura 5](#). Se opta por vigas compuestas con la utilización del acero que facilita tener luces grandes siguiendo la línea de piezas de madera de dimensiones reducidas poco invasivas.



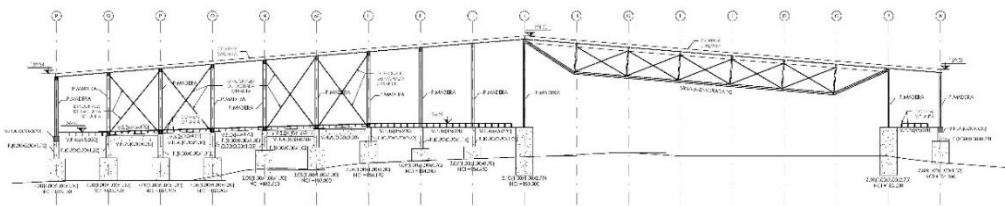


Figura 70: Viga atensorada y vistas 3D interior sector Parque

En la zona del Aula didáctica se desarrolla una solución para el entrepiso con vigas metálicas y pilares metálicos separados cada 6m que suben desde el nivel de cimentación hasta planta baja donde se da una transición a pilares de madera hasta el nivel de cubierta. La estructura sobre planta baja se desarrolla con pilares compuestos de madera cada 3m, salvo el sector que cubre la estructura preexistente donde no se colocan pilares y a nivel de cubierta se genera una viga atensorada mixta de madera y acero de 21m de luz. Sobre estas vigas se colocan correas de escuadrías de madera donde apoya una cubierta ligera de panel celular de policarbonato que se utiliza también para el cerramiento vertical en fachadas, [Figura 6](#).

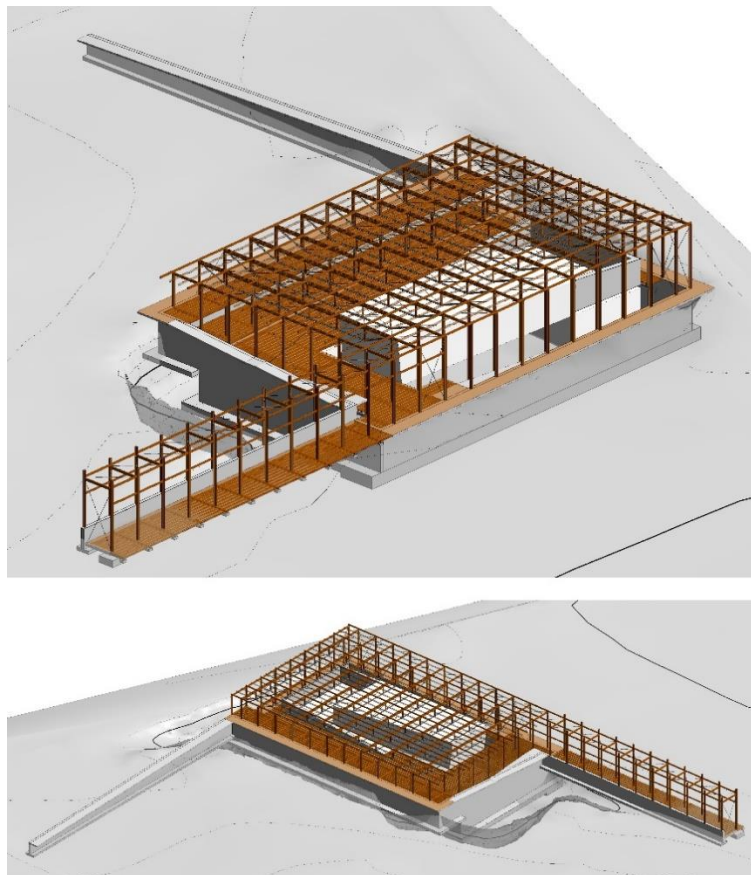


Figura 71: Modelo BIM estructura sector Aula didáctica

Los antecedentes del proyecto parcialmente ejecutado no se encontraron, por lo que no se conocen datos sobre la estructura preexistente, por lo que la idea desde un comienzo



fue envolverlo de manera autónoma y hubo que contemplar un muro de contención que complete y cierre el perímetro de la planta sótano con respecto al terreno circundante dado que no está ejecutado en su totalidad.

Aun así, en la zona del entrepiso sobre el edificio existente se coloca apoyos continuos por medio de una viga metálica donde descargan las correas separadas cada 40cm. En esta zona se deberá verificar estructuralmente el edificio existente frente a estos nuevos esfuerzos.

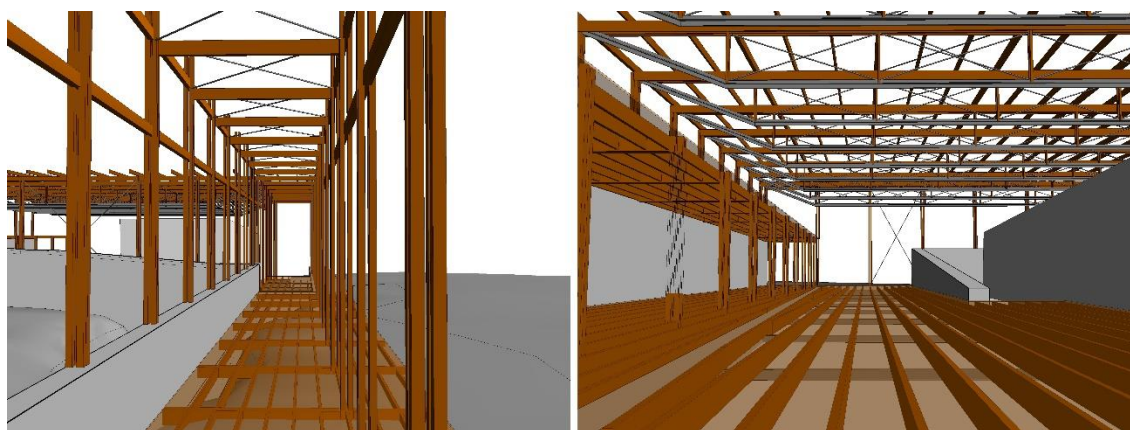


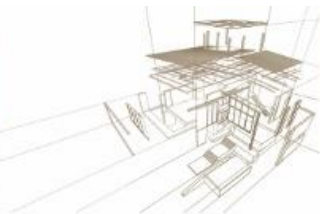
Figura 72: Vista 3D interior sector Aula didáctica

En cuanto a los procesos empleados en el dimensionamiento y comprobaciones de los distintos elementos estructurales y la metodología de análisis utilizada para cada uno de ellos se rigen en base normas, instrucciones o reglamentos y recomendaciones. Dentro de las principales se nombran el Código Técnico de la Edificación (CTE DB-SE M), Instrucción de hormigón estructural EHE (EHE-08) y diferentes Eurocódigos donde el principal fue el de proyectos de estructuras de madera (UNE-ENV 1995).

Este proyecto se desarrolla con una calidad de madera C24 cuyas propiedades de resistencia y rigidez se muestran en la [Tabla 1](#). A efectos de tratamientos superficial de la madera, y ya que zonas puntuales van a estar expuestas a la intemperie se realizará un tratamiento autoclave.

Tabla 21: Propiedades de resistencia, rigidez y densidad de madera clase C24

Resistencia a la flexión	24,0 MPa
Resistencia a la tracción paralela a la fibra	14,0 MPa
Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra	0,4 MPa
Resistencia a compresión paralela a la fibra	22,0 MPa
Resistencia a compresión perpendicular a la fibra	2,5 MPa
Resistencia a cortante	4,0 MPa
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra	11.600 MPa
Módulo de elasticidad perpendicular a la fibra	670 MPa
Módulo de cortante	690 MPa
Densidad	350 kg/m ³



Para determinar los esfuerzos en las piezas de la estructura se realizan modelos de cálculo que permiten realizar análisis lineales y no-lineales de estructuras de barras planas y paneles (2D) y espaciales (3D), según las teorías de primer y segundo orden, con un comportamiento de los materiales elástico y lineal. Del modelo se obtienen los esfuerzos en cada uno de los elementos estructurales, y con la ayuda de planillas de cálculo y números a mano, se verifica que los mismos son capaces de soportar los esfuerzos a los que están sometidos.

4. CONCLUSIONES

La voluntad formal del uso de la madera por sus características de calidez y liviandad, implicaron un desafío importante, ya que, para cubrir los requisitos de resistencia y estabilidad, las dimensiones de algunos elementos resultaban de gran tamaño. Esto condicionó la solución, y determinó la utilización de un sistema mixto, con madera y acero.

Los detalles de uniones entre elementos de madera y elementos mixtos es un aspecto que implicó alta complejidad, ya que todas las uniones son atornilladas y muchas veces fue necesario el uso de elementos auxiliares.

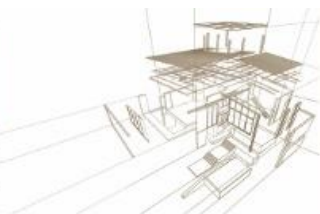
Al utilizar estructuras de madera favoreció a la visual, estética y por sobre todo el sistema no invasivo genera espacios amplios con la estructura pasando casi desapercibida, resaltando lo fundamental que son los yacimientos arqueológicos.

La concepción estructural frente a la sostenibilidad se puede visualizar en distintos aspectos del diseño de la estructura. Los aspectos que pueden contribuir a tener un edificio más sostenible son un diseño eficiente y flexible.

Un diseño eficiente desde el punto medioambiental es el que permite reducir tanto el impacto medioambiental de la estructura como los residuos que conlleva su ejecución. Por tanto, un diseño eficiente debe estar optimizado para conseguir un consumo mínimo de materiales. En este sentido se destaca el uso de uniones atornilladas que permite reutilizar fácilmente los elementos estructurales en futuras modificaciones o ampliaciones del complejo, permitiendo de esta manera reducir el empleo de material estructural.

El diseño de la estructura tiene que ser lo más flexible posible para el uso que se va a plantear considerando las posibles reformas o cambios de uso que se puedan producir a largo plazo. El diseño de los detalles debe facilitar los cambios de uso o la posibilidad de reciclar parte de la estructura. La estructura planteada en este caso contempla el diseño de módulos tipo que permiten la ampliación o adaptación a posibles cambios futuros.

Los tres materiales más usados en la construcción hoy en día son la madera, el acero y el hormigón. En este proyecto se combinan las diferentes virtudes de cada uno de ellos para potenciar las características y optimizar las secciones. La madera es un material diseñado para trabajar en dirección de la fibra, las mejores prestaciones de este material son trabajando a flexión con una buena relación resistencia peso, se utiliza principalmente para vigas de techo y entrepiso. El acero tiene muy buenas resistencias,



maximizando su sección utilizándolo a tracción, pero trabajando a compresión puede presentar problemas de pandeo dependiendo de su esbeltez. El hormigón está diseñado para trabajar a compresión donde se obtienen los mejores resultados, en este caso se opta por la utilización del hormigón en muros de contención y bases de pilares ya que por su peso contrarrestaban de forma eficiente los esfuerzos de levantamiento que producía el viento.

Es necesario considerar otros aspectos para el cálculo estructural como los estados límites de servicio como deformaciones, vibraciones, estados límites últimos como pandeos, vuelcos y cálculos en situación de fuego, por lo que el conocimiento de los distintos materiales ayuda a un perfecto dimensionamiento y una solución óptima para cada problema.

Al mirar los diferentes materiales se puede hacer una comparativa importante que son las emisiones de CO₂ equivalente según el sistema constructivo y el carbono almacenado. Según una publicación de EPA “Environmental Protection Agency” de Estados Unidos del 2016 muestra las diferencias de emisiones netas de CO₂ en la producción de diferentes materiales y el carbono almacenado. Los árboles en su formación y por la fotosíntesis almacenan carbono, a su vez si comparamos la emisión neta de CO₂ que produce en su transformación en producción frente al acero o hormigón, este material contribuye a frenar el cambio climático generando menos emisiones de las que almacena durante su ciclo de vida.

Una cualidad a destacar de la madera en comparación con estructuras de acero, es que presta mejores características frente al fuego. Se debe principalmente a su comportamiento de combustión lenta, de afuera hacia adentro, por su autoprotección que le confiere la capa exterior carbonatada y por su humedad intrínseca que se evapora antes de perder sección.

Las autoridades pusieron en valor la importancia de impulsar este proyecto, con un presupuesto de 2,7 millones de euros, cumpliendo así con una de las prioridades marcadas a principio de la legislatura de recuperar la memoria histórica y poner en servicio una oferta turística y cultural vinculada a la historia y orígenes de la población de la isla de Lanzarote.



Figura 73: Visita al parque por parte de autoridades



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Códigos Normativos:

CEN-AENOR (1997-1998). Acciones en estructuras (UNE-ENV 1991). Eurocódigo 1. España

CEN-AENOR (1993-1998). Proyecto de estructuras de hormigón (UNE-ENV 1992). Eurocódigo 2. España

CEN-AENOR (1996). Proyecto de estructuras de acero (UNE-ENV 1993). Eurocódigo 3. España

CEN-AENOR (1997). Proyecto de estructuras de madera (UNE-ENV 1995). Eurocódigo 5. España

Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de hormigón estructural. EHE-08. España

Ministerio de Vivienda (2006). Código Técnico de la Edificación. CTE DB-SE M. España

Páginas de internet:

MAP (2018). Zonzamas, el yacimiento desafortunado. Arrecife. Biosferadigital. Recuperado de: www.biosferadigital.com

Cabildo de Lanzarote (2018). Impulso definitivo al Museo de Sitio del yacimiento arqueológico de Zonzamas. Lanzarote. Cabildo de Lanzarote. Recuperado de: www.cabildodelanzarote.com



ESTUDO DE CASO DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CROSS LAMINATED TIMBER NO BRASIL

CASE STUDY OF CIVIL CONSTRUCTION IN CROSS LAMINATED TIMBER IN BRAZIL

Icimoto, Felipe ^{(1)*}; Belizário, Ana ⁽²⁾; Vairo, Maurizio ⁽³⁾; Reydam, Patrick ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Dr. Ingeniero industrial de madera en Amata. São Paulo, Brasil.

⁽²⁾ Arquitecta en Amata. São Paulo, Brasil.

⁽³⁾ Ingeniero civil en Amata. São Paulo, Brasil.

⁽⁴⁾ Ingeniero forestal en Amata. São Paulo, Brasil.

*⁽¹⁾ Contacto: felipe.icimoto@amatabrasil.com.br

Resumo

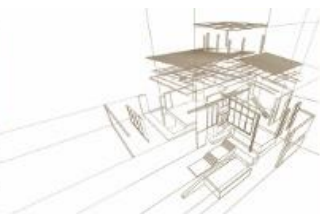
A construção civil brasileira está passando por um momento de transformação, onde o conceito de pré-fabricação está cada vez mais presente em grandes cidades como São Paulo e Rio de Janeiro. Neste contexto, as tecnologias engenheiradas de madeira como a Madeira Laminada Colada (MLC) e o Cross Laminated Timber (CLT) vêm ganhando destaque e estão se tornando uma opção para estruturas cada vez mais presentes nas especificações dos arquitetos dessas cidades. Atualmente no Brasil existem 3 empresas produtoras de MLC e uma empresa produtora de CLT. A empresa florestal Amata, com concessão de manejo florestal no estado de Rondônia, que também atua na plantação de eucalipto no Mato Grosso do Sul, Paricá no Pará e Pinus no Paraná, busca impulsionar o mercado madeireiro brasileiro construindo algumas obras na cidade de São Paulo. Este trabalho tem como objetivo apresentar o estudo de caso de uma edificação no Brasil fabricado com o CLT importado da Áustria.

Palabras-clave: Construção em madeira, MLC, CLT, Produtos de madeira engenheirada.

Abstract

Brazilian civil construction is undergoing a transformation moment, where the prefabrication concept is increasingly in big cities such as São Paulo and Rio de Janeiro. In this context the technologies in wood engineered products as Glulam and CLT have been gaining prominence and are becoming an option for structures increasingly present in the specifications of the architects of these cities. Currently in Brazil there are 3 companies producing Glulam and a company that produces CLT. The forest company Amata, with a forest management concession in the state of Rondônia, which also works in the Eucalyptus plantation in Mato Grosso do Sul, Paricá in Pará and Pinus reforestation in Paraná, is seeking to boost the Brazilian timber construction market by building some works in the city of São Paulo. This paper aims to present the case study of a timber construction in Brazil with CLT imported from Austria.

Keywords: Timber construction, Glulam, CLT, Wood Engineered products.



1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores setores consumidores de madeira serrada no Brasil é a construção civil, que utiliza madeira principalmente em sistemas de coberturas, portas, caixilhos, pisos e janelas. Ainda assim, o uso da madeira como elemento estrutural principal não tem representatividade nas construções brasileiras.

A madeira utilizada como estrutura principal em edificações é tradicional em países como Estados Unidos e Canadá que utilizam o Wood frame e Madeira Laminada Colada (MLC) como principais tecnologias, e nos países do centro e do norte da Europa, que além destas tecnologias utilizam o Cross Laminated Timber (CLT) em larga escala.

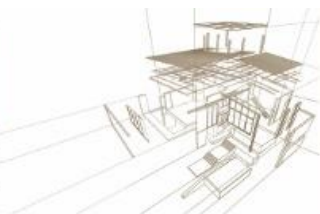
O CLT é um material construtivo ainda recente, mas que teve uma grande aceitação no mercado da construção civil e arquitetura, na América do Norte e Europa, por razões ambientais e competitivas que o deixa a frente dos materiais convencionais e até mesmo dos outros tipos de construções em madeira (Pereira, 2013).

O mercado de construção em madeira está crescendo no mundo e neste contexto as tecnologias em CLT e MLC, conhecidas como madeira engenheirada, se complementam proporcionando rapidez na obra e performance compatíveis com os usuais sistemas de concreto e aço. Os maiores edifícios estão localizados na Europa, berço das duas tecnologias. A MLC teve origem na Alemanha com Otto Hetzer no ano de 1906, já o CLT teve seu início na Áustria no ano de 1999. No Brasil existem 3 fábricas de MLC e 1 fábrica de CLT.

A qualidade técnica atual dos sistemas de madeira engenheirada têm permitido o desenvolvimento de projetos de edifícios multi-pavimentos com desempenho estrutural e de performance compatíveis com os usuais sistemas de concreto e aço. Através de métodos de produção industrializados, altos níveis de pré-fabricação e rápida montagem em obra, os sistemas construtivos em madeira começam a despontar desde o início dos anos 2000 em países como Áustria, Alemanha, Inglaterra, Canadá, Austrália e Estados Unidos, com alturas típicas entre 6 e 12 pavimentos, chegando a atingir 20 pavimentos em edifícios emblemáticos (Dangel 2017).

As ineficiências generalizadas da indústria da construção civil têm provocado um movimento de procura por sistemas pré-fabricados, com alto grau de detalhamento em ambiente virtual e preocupação com a cadeia de suprimentos e logística (MACKINSEY GLOBAL INSTITUTE, 2017). Dentro dos sistemas pré-fabricados, a madeira apresenta a vantagem da possibilidade de ser cortada, fresada e furada por CNCs, a partir de modelos virtuais, trazendo para a execução do projeto alto grau de precisão e produtividade (Lotufo 2018).

É importante ressaltar que a evolução dos sistemas estruturais de madeira impõe a necessidade de reavaliação de normas e legislações edilícias, passando de uma visão prescritiva para uma abordagem baseada em critérios de performance (Green 2017). Nesse sentido, o aprofundamento das discussões atuais sobre desempenho das edificações, impulsionada no Brasil a partir da vigência da ABNT NBR 15575:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho, são de fundamental importância para o desenvolvimento futuro da tecnologia.



Além da compreensão dos requisitos de desempenho, a durabilidade da madeira depende de projeto, detalhamento, execução e manutenção adequados, além da adoção criteriosa de soluções de preservação e tratamento. A perspectiva da evolução da linguagem arquitetônica tradicional em madeira, para seu novo momento histórico, passa pela reinterpretação desses conceitos à luz das exigências e requisitos construtivos da atualidade (Jones 2017).

A norma brasileira ABNT NBR7190:1997 – Projetos de Estruturas de Madeira afirma que por se tratar de um material orgânico sujeito à biodeterioração, no desenvolvimento do projeto de uma estrutura de madeira é preciso assegurar uma durabilidade mínima compatível com sua finalidade. A norma diz também que na execução das estruturas de madeira, devem ser empregadas espécies que apresentem boa permeabilidade aos líquidos preservativos e que sejam submetidas a tratamentos preservativos adequados e seguros para a estrutura.

A escolha do tipo de tratamento e do produto preservante a ser utilizado no Brasil deve ser realizada considerando as categorias de uso, estabelecidos pela norma ABNT NBR16143:2013 – Preservação de Madeiras – Sistema de Categoria de Uso. Este sistema é dividido em seis categorias baseadas nas condições ambientais de exposição ou uso da madeira e nos possíveis agentes biodeterioradores xilófagos presentes. As categorias 1 e 2 englobam madeira sem contato com umidade sendo recomendado somente aplicação de inseticida. Nas categorias 3, 4 e 5 existe o contato com umidade, sendo necessário a aplicação de inseticida e fungicida.

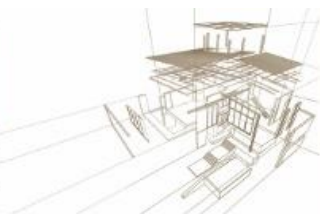
Para a melhoria de desempenho da madeira frente aos agentes ambientais são usados diversos produtos geralmente aplicados por pincelamento. Estes são os acabamentos para madeira, que devem prover: proteção ao substrato, aumentar a estabilidade dimensional, com efeito hidro-repelente, suavizar a superfície por meio da uniformização das fibras e valorizar esteticamente a madeira (Lepage 2017).

Os produtos impermeabilizantes empregados em madeira têm a função de selar (vedar) os poros da madeira para que não seja absorvida umidade e com isso não ocorra patologias devido a proliferação de fungos apodrecedores e manchadores.

O Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, em sua Instrução Técnica N°08/2018 (IT08), exige que toda edificação com área maior que 750m², com elementos de construção em madeira receba um tratamento de retardante de chama independente da resistência da estrutura e das possíveis isenções ou reduções do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

A solução retardante de chamas consiste em inibir as chamas nos materiais, evitando que o fogo se alastre a outros ambientes e materiais combustíveis. O produto preferencialmente deve ser incolor, inodoro, versátil e fácil de ser utilizado.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA), toda madeira importada que entre no país, deve receber um certificado fitossanitário, definido pela “Instrução normativa nº 5, de 28 de fevereiro de 2005”.



2. METODOLOGIA

Este trabalho consiste em apresentar o projeto do primeiro edifício do Brasil com mais de 2 pavimentos construído em um sistema de pilares e vigas em MLC e lajes em CLT.

2.1. O projeto

O edifício está localizado na Avenida Faria Lima, região conhecida por ser um dos principais centros financeiro e de negócios da cidade de São Paulo. O imóvel será utilizado como fábrica para produção de chocolates e showroom dos produtos da marca.

A arquitetura concebeu a edificação a partir da sobreposição de volumes em formato de cubos, suprimindo alguns destes elementos à medida que o edifício ganha altura. Isso faz com que a área fabril possua um pé direito triplo, criando uma vista diferenciada para os clientes da loja.

Situado em um terreno de 800 m², o edifício conta com uma área total de aproximadamente 2200 m², distribuída em 5 pavimentos, sendo um subsolo e uma torre de 10 metros de altura acima do nível do térreo, dividida em 3 pavimentos com o piso a piso aproximadamente igual.

O subsolo será utilizado como estacionamento de veículos, vestiários e reservatórios de água. No pavimento térreo, estão localizados os maquinários para produção dos chocolates, os estoques de matéria prima e loja para venda e exposição dos produtos. E estrutura destes dois pavimentos foram projetadas em concreto armado.

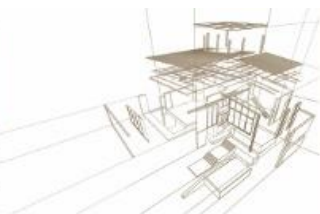
O primeiro pavimento dispõe de áreas fabris, região para embalagens além de um hall de exposição da fábrica. No segundo pavimento encontram-se os escritórios, salas de reunião e estoques para armazenamento dos produtos já embalados. O terceiro pavimento será utilizado como área técnica, com equipamentos de exaustão e ar condicionado cobertos por pergolados de madeira.

Na torre acima do térreo, os elementos estruturais são de madeira engenheirada. Os pórticos são compostos por pilares e vigas de MLC, que transferem as cargas verticais para capitéis de concreto armado localizados no pavimento térreo. Já as lajes foram concebidas em CLT, sempre bi-apoiadas nas vigas de MLC. O vão típico da estrutura é de aproximadamente 5,5 m, exceto por uma viga I composta por mesas de MLC e alma de CLT que conta com um vão de 11 m.

A rigidez lateral da torre é garantida pela adoção de dois núcleos de inércia de concreto armado, onde se encontram as escadas e os elevadores.

2.2. Cross Laminated Timber (CLT)

O fornecedor de CLT deste projeto foi a empresa austríaca KLH, que utiliza a madeira de *Picea abies* (nome comum, Espruce europeu) em quase a totalidade da sua produção, além das espécies, *Pseudotsuga menziesii* (nome comum, Douglas fir) e *Pinus sylvestris* (nome comum, Pine) Os painéis padrões (chamado master panel) são fabricados com comprimento máximo de 16,5m, largura de 2,40m à 2,95m e as espessuras variam de 57mm (painéis de 3 camadas) até 320mm (painéis de 8 camadas). Os painéis recebem



uma classificação quanto a aparência em: non-visible quality (NVQ), industrial visible quality (IVQ) e domestic visible quality (DVQ).

A empresa vende o CLT sem tratamento no mercado europeu, porém devido ao clima tropical brasileiro, tomou-se a decisão em fabricar os painéis de CLT com o *Pinus sp.* tratado e o *Spruce* não tratado, ambas espécies plantadas na Áustria. Todos painéis (paredes e pisos) foram fabricados com 5 camadas de espessura, sendo 4 camadas de *Pinus sp.* tratado e 1 camada externa de *Spruce* não tratado. A estratégia de utilizar uma camada de *Spruce* sem tratamento surgiu da premissa da arquitetura mitigar o efeito da coloração esverdeada que o tratamento em autoclave adotado impõe.

A madeira de *Pinus sp.* foi tratada em autoclave com o produto enquadrado na classe de uso 4, com retenção de 5kg/m³ de ingrediente ativo, o que permite a condição de uso para o exterior da construção em contato com o solo ou água doce. Este tratamento protege a madeira contra fungos apodrecedores (podridão branca, parda e mole), brocas de madeira e cupins subterrâneos (Brazolin et al 2019).

Para colagem dos painéis foi utilizado adesivo estrutural poliuretano (PUR) livre de formaldeído, aprovado pela norma europeia CEN - EN15425: 2017 Adhesives - One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements.

Para os acabamentos superficiais no CLT foram aplicados sequencialmente os produtos: fungicida (1 demão), retardante de chamas (1 demão), verniz isolante (1 demão), verniz piso água acetinado catalisado (2 demãos).

2.3. Madeira Laminada Colada (MLC)

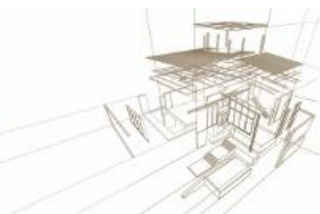
As vigas e pilares de MLC foram produzidos pela empresa brasileira BRAREWOOD, utilizando madeira de *Pinus sp.* tratado com CCA. Para a colagem foi utilizado adesivo estrutural poliuretano (PUR) livre de formaldeído aprovado pela norma europeia CEN - EN15425: 2017.

Os acabamentos superficiais nas vigas e pilares de MLC foram aplicados na seguinte sequência: retardante antichamas (1 demão), verniz isolante (1 demão), hidrorrepelente base água com duplo filtro solar (3 demãos) e argamassa polimérica impermeabilizante (1 demão).

2.4. Importação

Após fabricação dos painéis e acomodação em 4 containers de 40 pés, coube a AMATA Brasil realizar a retirada do produto no pátio da KLH, na cidade de Teufenbach-Katsch na Áustria e enviar, via marítima, para o porto de Itajá em Santa Catarina no Brasil. O tempo necessário entre o envio do orçamento pela KLH, pagamento pela Amata, produção dos painéis e transporte marítimo até o porto do Brasil foi de 19 semanas.

Para assessorar na importação da madeira, com relação os tramites burocráticos da importação, logística de retirada na Áustria e entrega dos painéis de CLT no Brasil, foi contratada uma empresa Trader.



A alfandega brasileira exigiu também certificado fitossanitário dos painéis, e uma inspeção fitossanitária foi realizada ao desembarcar o CLT no Brasil antes do desembarço aduaneiro.

3. RESULTADOS

Devido ao empreendimento ser uma fábrica de chocolates, onde serão manipulados alimentos, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) exigiu que fossem realizadas impermeabilizações nos pisos e teto de áreas laváveis. Para isso foi adotado o produto verniz piso água acetinado catalisado.

Os caixilhos são de alumínio vermelho, a fachada frontal da edificação recebeu uma pele vidro que deixa a madeira visualmente exposta mas não em contato direto com as intempéries, assim como apresenta a Figura 1.



Figura 1: Render da fábrica

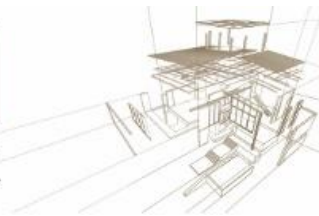
Os pisos de toda edificação são compostos de CLT cobertos com manta betuminosa elastoplastomérico acoplado a um feltro resiliente de poliéster. Acima da manta betuminosa, o piso interno recebeu um piso elevado seco e revestimento cerâmico. Já o piso externo recebeu um sistema de impermeabilização de alta performance para grandes coberturas comerciais e industriais. Feito de poliolefina termoplástica flexível e reforçado com uma trama de poliéster. Ele reflete luz solar, contribui na economia de energia e reduz a temperatura interna. Além disso, o produto assegura máxima resistência contra raios ultravioletas, ozônio, exposição química e intempéries. Logo acima foi instalado deck de madeira. As soluções adotadas para os pisos internos e externos se diferenciam como apresentado na Figura 2.



CLEM

2019

18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

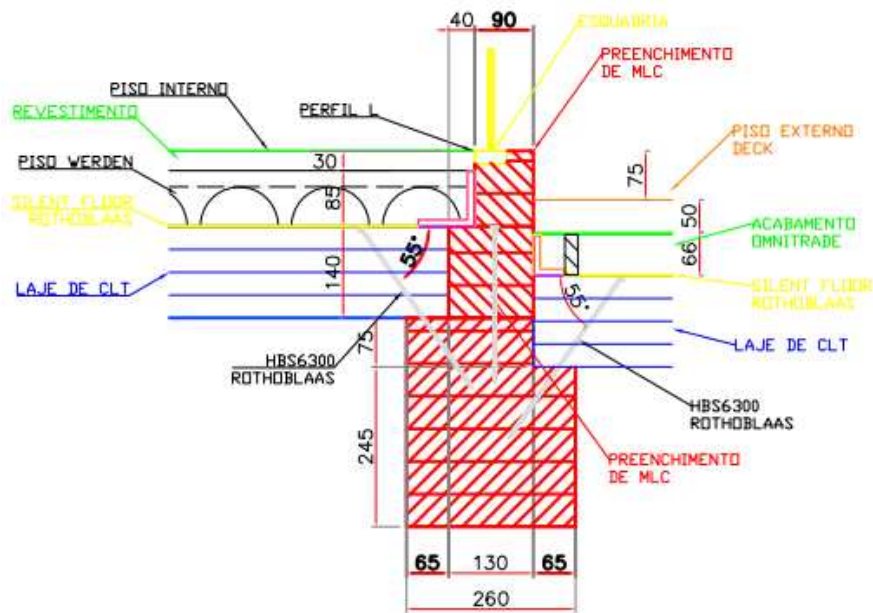


Figura 2: Detalhamento das soluções dos pisos interno e externo.

A fachada frontal da edificação (Figura 3) é composta por pele de vidro e as paredes da fachada lateral e dos fundos são compostas de sistema wood frame, como apresentado na Figura 4.

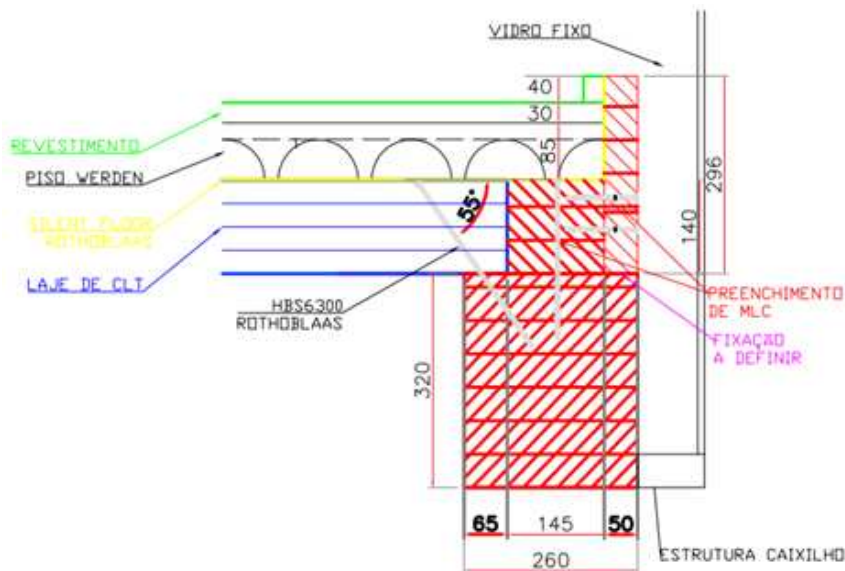


Figura 3: Sistema da fachada frontal com pele de vidro.

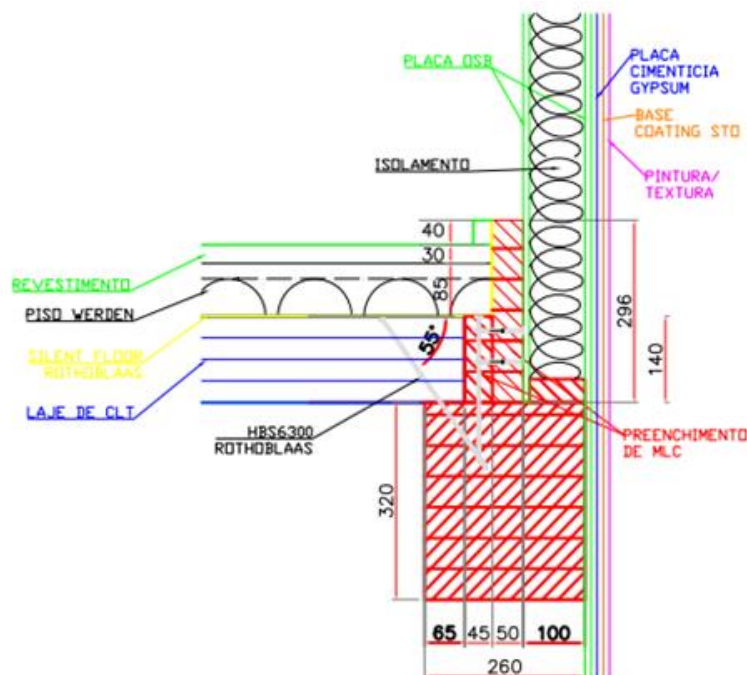
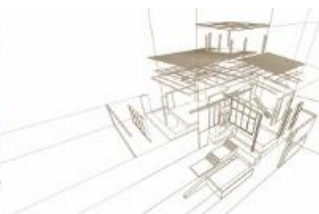


Figura 4: Sistema da fachada lateral em wood frame.

4. CONCLUSÕES

Esta experiência em projetar em CLT e adotar soluções para este tipo de construção está sendo muito importante para todos envolvidos: projetistas, arquitetura e construtora. Além proporcionar ao mercado da construção civil uma nova opção além das tradicionais: concreto armado, concreto pré-moldado, alvenaria e pré-fabricado de aço.

O Brasil, sendo um país de dimensões continentais e com clima propício ao cultivo de Pinus, tem grande potencial de fornecimento de produtos industrializados engenheirados de MLC e CLT para toda América do Sul.

Neste contexto a empresa Amata pretende montar uma fábrica de MLC e CLT no Brasil. Para isso a estratégia da empresa é criar a demanda, fomentando o mercado brasileiro com CLT produzido na europa e assim desenvolver um mercado consumidor de madeira engenheirada, para que no futuro o mercado brasileiro consuma os produtos produzidos nesta indústria.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa austríaca KLH, e as empresas brasileiras AMATA, BRAREWOOD, BRENV, COMEXPORT, DENGGO e PEDRA FORTE.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). ABNT NBR7190: Projetos de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro.

_____. (2013a). ABNT NBR15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro.

_____. (2013b). ABNT NBR16143: Preservação de Madeiras – Sistema de Categoria de Uso. Rio de Janeiro.

Brazolin, S., Miranda, M. J. de A. C., D’Almeida, M. L. O. (2019). IMPRALIT KDS: Revisão bibliográfica sobre o desempenho no controle de organismos xilófagos. Parecer Técnico 21089-301. CT-Floresta-Centro de Tecnologia de Recursos Florestais, Brasil.

Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (2018). Instrução Técnica 08/18 – Segurança Estrutural nas Edificações (Resistência estrutural contra incêndio). São Paulo.

Dangel, U. (2017). Turning Point in Timber Construction: A New Economy. Birkhäuser Verlag, Basileia, Switzerland.

European Committee for Standardization (2017). CEN - EN15425: Adhesives. One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures. Classification and performance requirements. Brussels.

Green, M. (2017). Tall Wood Buildings: design, construction and performance. Birkhäuser Verlag, Basileia, Switzerland.

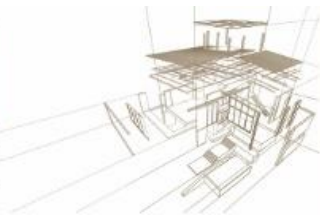
Jones, S. (2017). Mass Timber: Design and Research. Oro Editions, Novato, CA, USA.

Lepage, E., de Salis A. G., Guedes E. C. R. (2017). Tecnologia de proteção da madeira. Montana Química, São Paulo, SP. Brasil.

Lotufo, G. (2017). Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, SP.

Mckinsey Global Institute. Reinventing Construction: a route to higher productivity. 2017. Disponível em <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-construction-A-route-to-higher-productivity-Full-report.ashx>. Acesso em: 20 jan. 2018.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (2005), Instrução normativa nº5. Brasília.



AVANCES EN EL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN EN MADERA EN BRASIL

ADVANCES ON TIMBER CONSTRUCTION USING NEW TECHNOLOGIES IN BRAZIL

STAMATO, Guilherme C. ^{(1)*}, LOPEZ, Gonzalo A. C. ⁽²⁾, SILVA, Gisleine A. da ⁽³⁾

⁽¹⁾ Consultor da ABPM – Associação Brasileira de Preservadores de Madeira; Diretor STAMADE Projeto e Consultoria em Madeira. São Carlos-SP, Brasil

⁽²⁾ Presidente da ABPM; Biólogo e Pesq. do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, Brasil

⁽³⁾ Coordenadora Técnica da ABPM; Química e Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, Brasil

* Contacto: stamade@terra.com.br

Resumen

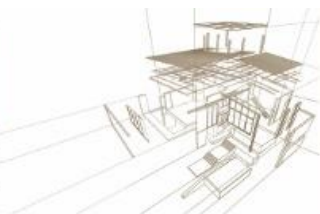
Este trabajo presenta un panorama general de la evolución del uso de nuevas tecnologías en las construcciones de madera en Brasil en los últimos años, en especial en las construcciones en *woodframe*, en Madera Laminada Colada y en CLT. Asociada a esta evolución, las normas brasileñas también están siendo actualizadas y las alteraciones más significativas serán presentadas aquí, como la revisión de las normas de Proyecto de estructuras de madera, de Preservación de maderas e la creación de la norma de construcciones en *woodframe*. Además de las normas, se presentará la Directriz SINAT 005 para construcciones en *woodframe* de edificios de hasta cuatro pavimentos, con ejemplos de ese tipo de construcción, los cuidados principales que deben ser tomados para garantizar la eficiencia y la durabilidad de esas estructuras en vista de nuestras condiciones climáticas las cuales resultan en nuestra diversidad de organismos xilófagos, como hongos y termitas. Entre estos cuidados, podemos citar el programa de autorregulación QUALITRAT, creado por la Asociación Brasileña de los Preservadores de Madeira-ABPM, como una forma de garantizar la correcta utilización de los productos con atención a las normas vigentes en su preparo, principalmente a todos los usuarios de la madera tratada. El resultado de estos avances se nota un aumento significativo de las construcciones en madera en Brasil, pudiéndose citar la construcción de más de 1000 unidades/año, así como construcciones en Madeira Laminada Colada icónica, con premios internacionales e inversión de empresas en nuevas producciones de productos de madera, tales como LVL y CLT.

Palabras-clave: Estructuras de madera, woodframe, preservación, normatización

Abstract

This paper presents an overview about the advances in the use of new technologies on timber construction in Brazil in last years, especially in *woodframe* construction, in Glulam and more recently on CLT. In Association with this advances, the related Brazilian codes are also being updated and the most significant changes are presented in this paper, as the changes on the Timber Structure code, the wood preservation code and the development of a specific *woodframe* code. In addition of this, this paper presents also the SINAT 005, a Guidelines for *woodframe* construction for buildings up to 4 storeys, presenting some examples of this buildings, main care that must be taken to ensure the building efficiency and durability, considering Brazilian climatic conditions and xylophages organism biodiversity. Among this, it is presented the QUALITRAT self-regulation program, created by the Brazilian Association of Wood Preservers, ABPM, as a way to guarantee the correct utilization of preservatives and compliance with the current standards, especially for all users of treated wood. The result of this advances has been a significant increase of timber construction in Brazil, for example the number of *woodframe* reaching 1000 residences/year, as well as the iconic Glulam buildings internationally awarded and companies investment in new productions of engineered products such as LVL and CLT

Keywords: timber structures, woodframe, wood preservation, standardization



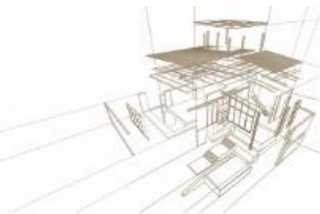
1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o aumento da demanda por construções em madeira tem sido observado em todo o mundo, principalmente focado no uso de novas tecnologias e de novos produtos engenheirados de madeira, com os quais tem sido possível um grande aumento do desempenho energético das edificações, aumento da industrialização das construções, além dos aspectos de sustentabilidade relativos ao uso de um material renovável e que sequestra carbono. No Brasil essa tendência também tem se confirmado, com um sensível aumento das construções com madeira e com o surgimento de novas indústrias com foco em Produtos Engenheirados de Madeira, tais como Madeira Laminada Colada, Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) e Laminados unidirecionais (LVL). Em relação aos sistemas construtivos, a quantidade e a complexidade das construções com madeira também tiveram um grande incremento, bem como a inserção de novas ferramentas de projeto e de produção, tais como softwares de cálculo e de desenho, Centros de Usinagem de peças de madeira e centros de produção automatizados de woodframe. O aumento do uso de novas tecnologias e de produtos engenheirados tem alterado o perfil de utilização de madeira em construção, que historicamente se baseava em madeira nativa e em carpintaria manual, para o uso de madeira de reflorestamento com processos automatizados e maior desempenho e eficiência técnica. Como consequência, as normas brasileiras tem sido revisadas e até novas normas estão sendo criadas, estabelecendo parâmetros e critérios mais claros para as construções em woodframe, em madeira laminada colada, ou utilização de outras técnicas de construção mais modernas.

Estão apresentados a seguir alguns pontos inseridos nas normas brasileiras, bem como a criação de novas normas com foco na eficiência das construções residenciais. São apresentados também alguns exemplos de construções e informações sobre a produção de produtos engenheirados, de construções em MLC, em CLT e em woodframe, indicando a evolução dos últimos anos, ilustrando com algumas obras de referência que indicam esse crescimento.

2. AUMENTO DA DEMANDA POR CONSTRUÇÕES EM MADEIRA

Nos últimos 10 anos o número de casas de *woodframe* construídas partiu de praticamente zero para mais mil unidades por ano. Esse crescimento é um grande termômetro para avaliar o aumento da demanda por construções em madeira com mais tecnologia. O principal foco de mercado para o *woodframe* em unidades construídas atualmente está nas residências de pequeno porte, dentro do programa Minha Casa Minha Vida. A vocação das construções residenciais de padrão mais alto em woodframe também está sendo explorada por novas empresas que estão surgindo nos últimos anos. Além do *woodframe*, a produção de Madeira laminada colada também aumentou significativamente. Há 20 anos havia apenas uma indústria de Madeira Laminada Colada efetivamente produzindo no Brasil, a Esmara, no Rio Grande do Sul. Hoje são 5 empresas atuando efetivamente no mercado de Madeira Laminada Colada. Com produção de aproximadamente 1600m³/ano. Esse aumento da demanda por Madeira Laminada Colada está principalmente fundamentado em projetos de arquitetura de casas de alto padrão, com algumas exceções significativas de construções comerciais ou



educacionais. A utilização das estruturas de madeira laminada colada desenhada por arquitetos renomados no Brasil tem causado grande exposição desse material e proporcionado uma maior procura por essas estruturas, partindo de novos projetos arquitetônicos inspirados em outros projetos bem sucedidos, criando uma espiral positiva de crescimento. Recentemente se iniciou a produção de LVL (Laminated Veneer Lumber) e de CLT (Madeira Laminada Colada Cruzada), que além de produzidos no país também tivemos algumas obras construídas com CLT importado da Europa.

3. ATUALIZAÇÕES DAS NORMAS TÉCNICAS

As normas técnicas têm desempenhado papel relevante nas transações comerciais no mercado nacional e internacional. Em linhas gerais, às normas técnicas cabe a atribuição de determinar requisitos técnicos específicos relacionados a produtos, processos, sistemas e serviços.

São também instrumentos que desenvolvem e regulam o mercado, estabelecendo parâmetros que orientam tanto o produtor quanto o consumidor.

No Brasil, o único Foro Nacional de Normalização é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que atualmente tem em andamento comissões de estudo para revisão/elaboração de normas importantes para o setor de construções em madeira.

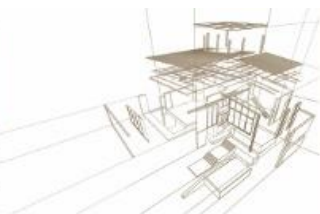
3.1. Projeto de Estruturas de Madeira - NBR 7190

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 – “Projeto de estruturas de madeira” foi completamente revisada em 1997 e passou ser fundamentada no Método dos Estados Limites, que é um método Probabilístico, muito mais evoluído que o anterior Método das Tensões Admissíveis, em especial por tratar separadamente os diversos efeitos que afetam a resistência e rigidez da madeira. Por exemplo, os Coeficientes de Modificação, K_{mod} , que tem valores diferenciados em função da duração do carregamento (fluência), do teor de umidade, da qualidade da madeira, etc. Essa norma, publicada em 1997, está em processo final de revisão, fazendo alguns ajustes em itens específicos que foram observados ao longo do uso nesses últimos anos. Entre as alterações está a adoção da resistência e Rigidez à flexão como parâmetro base de qualificação da madeira, já que a versão de 1997 utilizava a compressão paralela às fibras como referência, e não a flexão como as demais normas internacionais.

Outro ponto em alteração refere-se aos à verificação da instabilidade na compressão, com a adoção dos critérios de verificação da instabilidade lateral na compressão conforme Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2004)

Também foram inseridos conceitos mais direcionados para o uso de madeira laminada colada, tais como o Coeficiente de modificação K_{mod3} , que leva em consideração o tipo de emenda de topo das lamelas e a curvatura de vigas em relação à espessura das lamelas.

Foi inserido também os Critérios de Dimensionamento de peças compostas considerando o método gama para consideração da composição parcial, que permite o



dimensionamento de CLT e composição como Madeira e concreto, da forma como é apresentado também no EUROCODE 5.

O Dimensionamento das ligações por pinos metálicos também estão sendo alterados para consideração de diversos modos de ruptura diferentes, já que a versão de 1997 considera apenas dois modos de ruptura.

Um capítulo novo foi criado para tratar dos critérios de verificação de Segurança das estruturas de madeira em situação de fogo, seguindo os critérios do Eurocode 5, parte 1-2 (EN 1995-1-2).

Em complementação à norma principal de Projeto de Estruturas de madeira, também estão sendo criadas novas normas complementares referente à classificação de madeira, realização de ensaios para caracterização de resistência de madeira e de ligações.

3.2. A qualidade da madeira preservada e a criação da norma NBR 16.143

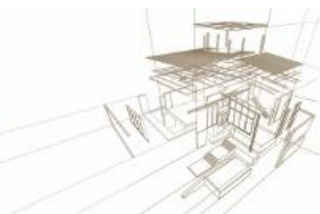
A atividade industrial de preservação de madeiras no Brasil tem seu início junto com a instalação de ferrovias; a primeira usina de tratamento sob pressão foi instalada por volta de 1902.

Com o passar dos anos, o aumento da participação dos setores público e privado e o desenvolvimento de pesquisas na área de preservação de madeiras, culminaram, em 1969, com a criação da ABPM - Associação Brasileira de Preservadores de Madeira. Logo após, em 1972, a ABPM estabeleceu com o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo um convênio que permite aos associados realizar análises químicas, ensaios biológicos e físico mecânicos, primando dessa forma, pelas questões da qualidade dos seus processo e produtos.

A ABPM atua como fórum nacional do setor de madeira preservada no Brasil, representando o segmento junto aos órgãos reguladores e Poderes Legislativo e Executivo. Reúne em seu quadro associativo usinas de preservação de madeiras, indústrias químicas, universidades e empresas que utilizam madeira tratada.

Em decorrência da revisão da norma NBR 7190, a comissão da ABNT que tratava desse assunto convidou a ABPM para preparar um capítulo referente à Preservação de Madeira para aquela norma. Tal capítulo tornou-se tão completo e abrangente que a ABNT se propôs a publicar uma norma exclusiva sobre Preservação de Madeiras. Essa norma, NBR 16143:2013 – “Preservação de madeiras - Sistema de categorias de uso” foi desenvolvida seguindo os conceitos de normas semelhantes, em especial a norte americana, que relaciona a necessidade e a especificidade do tratamento em função da condição de uso a que a madeira será exposta, com a dificuldade de substituição da peça e com a responsabilidade estrutural que essa peça assume na estrutura. Essa norma foi publicada em 2013, antes mesmo de ser finalizada a revisão da NBR 7190.

Deve-se destacar que não existem no Brasil informações consistentes sobre a durabilidade de construções com madeira engenheirada, nem de curto ou de longo prazo, principalmente em áreas de alto risco de ataques de organismos xilófagos – fungos ou cupins. Os sistemas construtivos de madeira engenheirada podem ser classificados em diferentes categorias de acordo com essa Norma, e a partir dessa



classificação são definidos os métodos e produtos adequados para a devida proteção dos componentes de madeira.

Levando-se em conta que as espécies de madeira mais utilizadas são predominantemente de baixa ou média resistência natural, como o pinus (*wood frame*, MLC e CLT), apenas a utilização dos produtos preservativos em processos de tratamento com vácuo e pressão pode garantir a durabilidade estabelecida em norma para peças estruturais.

Dados apresentados na 25ª Assembleia Geral Ordinária da ABPM mostraram que dentro das amostras analisadas pelo IPT em 2015, ainda se produz madeira tratada que não atende os requisitos mínimos das normas técnicas vigentes.

Esse é um fator preocupante, principalmente para a construção civil, onde a norma de desempenho NBR 15.575:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho, estabelece uma vida útil de no mínimo 50 anos para a estrutura principal da edificação.

Visando preservar os interesses de produtores e consumidores, em 2014 a ABPM criou um programa de auto-regulamentação denominado Qualitrat, que garante qualidade e legalidade ao consumidor de madeira tratada. O selo de qualificação é concedido às usinas que atendam plenamente critérios legais, de qualidade (de acordo com as normas do setor), meio ambiente, saúde e segurança.

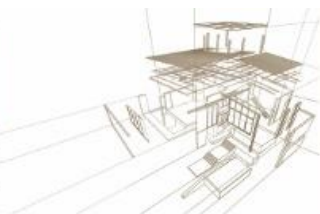
Para a obtenção do selo Qualitrat, as usinas devem atender requisitos mandatórios e desejáveis nos quesitos:

- Habilitação e idoneidade jurídica
- Gestão da qualidade dos procesos
- Gestão ambiental
- Regularidade social, trabalhista, gestão de saúde e segurança
- Ética e responsabilidade social

3.3. Desempenho de edificações – construções residenciais

Em 2013 foi publicada e entrou em vigor a Norma ABNT NBR 15.575 – “Edificações Habitacionais – Desempenho” dividida em seis partes, essa norma apresenta critérios claros de desempenho relacionados à segurança das estruturas, à sua durabilidade, ao desempenho térmico, ao desempenho acústico, ao comportamento em situação de incêndio, à estanqueidade de elementos de fachada e de áreas molhadas, etc. Essa norma condensa um grande número de especificações técnicas de outras normas Brasileiras e internacionais, com o objetivo de disciplinar o desempenho das edificações de qualquer sistema construtivo, seja em alvenaria, seja em concreto, seja em estruturas metálicas, estruturas de madeira ou outra.

Essa norma passou a ser a referência para a aprovação de financiamentos imobiliários de bancos públicos no Brasil, em especial quando se tratava de algum sistema construtivo inovador em relação à construção tradicional brasileira, em alvenaria e concreto. Para tanto, o Governo Federal Brasileiro criou o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT), como parte do já existente Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), Formado por um comitê técnico que avalia as propostas de sistemas inovadores, que devem ser desenvolvidas e apresentadas



pelas Instituições Técnicas Avaliadoras (ITA). Para atender esse sistema, cada sistema construtivo tido como inovador, perante as práticas de construção tradicionais no Brasil, devem elaborar uma Diretriz SINAT, onde devem constar a descrição do sistema construtivo, os materiais a serem utilizados, suas especificações técnicas e as normas pertinentes para atender aos critérios de desempenho, conforme apresentado na NBR 15.575.

Um grupo de empresas e profissionais liberais interessados em desenvolver o uso de woodframe no Brasil criaram a “Comissão Casa Inteligente”, na Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP), e em 2011 conseguiram a publicação da primeira versão da Diretriz SINAT 005 – “Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Wood Framing*”)”, se tornando o primeiro documento governamental com especificações claras para a construções de residências em *woodframe* no Brasil, e viabilizando as construções em *woodframe* nos programas de habitação financiados pelo governo Brasileiro, em especial o Minha Casa Minha Vida. A primeira versão dessa Diretriz atendia construções residenciais térreas. Novas revisões foram feitas e atualmente a Diretriz SINAT 005 se aplica para construções unifamiliares térreas ou sobrados e para construções multifamiliares de até 4 pavimentos.

No ano seguinte a empresa TECVERDE Engenharia teve aprovado seu Documento de Avaliação Técnica (Datec), que certifica que essa empresa atende todos os quesitos da Diretriz SINAT 005. A partir de então a TECVERDE passou a atuar em construções populares em woodframe, o que aumentou significativamente a quantidade de habitações em woodframe construídas no Brasil, como será apresentado no item 4.

Com o crescimento da demanda de *woodframe* e aumento do interesse tanto do setor produtivo quanto de consumidores, em 2017 a Comissão Casa Inteligente criou junto à ABNT a Comissão de estudos para a criação de uma norma ABNT exclusiva para construções em *woodframe* no Brasil. Essa norma tomou como ponto de partida o texto da Diretriz SINAT 005, para construções residenciais ou comerciais, com até dois pavimentos. Em se tratando de uma norma de sistema construtivo, essa deve ser mais abrangente que a Diretriz SINAT, porém deve também respeitar as demais normas brasileiras. Para tanto, esse grupo tem se reunido periodicamente e o texto da norma está prestes a ser submetido à consulta pública.

4. CONSTRUÇÕES RECENTES

A evolução das construções em madeira com novas tecnologias tem sido significativa, mesmo considerando a crise que passa o setor da Construção Civil no Brasil. Não existe uma estatística de órgãos oficiais relativos à construção em madeira no Brasil. Os autores fizeram uma pesquisa diretamente com as empresas que se tem notícia de que estão construindo em *woodframe* no Brasil nos últimos 10 anos, o resultado foi formatado e está apresentado na Figura 1.

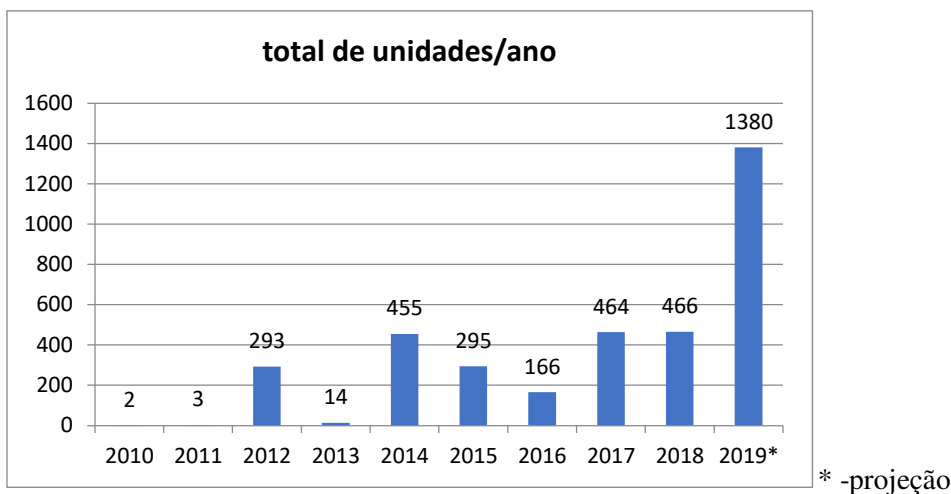


Figura 1: Número de Unidades Habitacionais em woodframe construída por ano – Fonte: empresas do setor

Essas unidades Habitacionais foram executadas por diversas empresas, destacando-se a TECVERDE Engenharia S.A. tanto em unidades construídas quanto em metros quadrados. A TECVERDE também é responsável pela construção de edifícios multifamiliares, com até quatro pavimentos. A existência de outras empresas de construção em woodframe também é relevante, principalmente no mercado de casas de mais alto padrão, onde algumas vezes uma única residência tem metragem quadrada equivalente à 20 casas do programa Minha Casa Minha Vida. A Figura 2 apresenta o total de metros quadrados de woodframe construídos no Brasil nos últimos 10 anos.

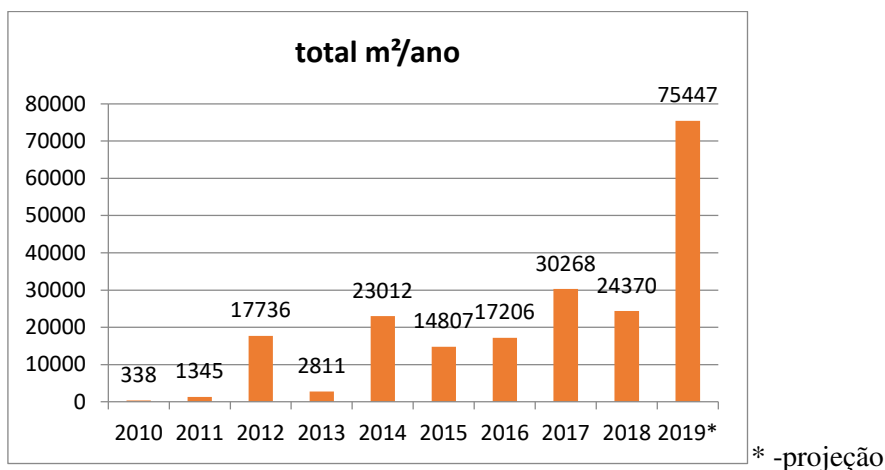


Figura 2: Total de metros quadrados em woodframe construída por ano – Fonte: empresas do setor

A seguir são apresentados alguns exemplos dessas construções

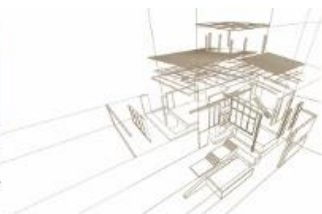


Figura 3: Casas térreas em Durados – MS, construídos pela TECVERDE. Fonte: do autor



Figura 4: Residencial Pinhais Park, primeiros edifícios multifamiliares com 4 pavimentos, construídos pela TECVERDE. Fonte: TECVERDE



Figura 5: Condomínio de casas construído pela TETTI em Itapeva-SP – Fonte: do autor.



Figura 6: Residência de alto padrão construída em Votorantim-SP, pela Shintech –Instagram @shintech



Figura 7: Sobrado residencial construído em Bituruna-PR pela Immergrun – Fonte Immergrun



Figura 8: Residência de Alto Padrão construída em Limeira-SP, pela MG Homes – Fonte MGHOMES

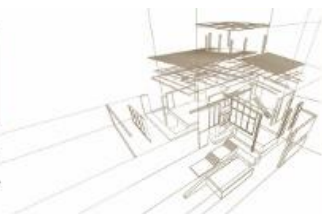


Figura 9: Casa de alto Padrão na região de Vinhedo-SP, construída pela Tecverde. Fonte: TECVERDE.

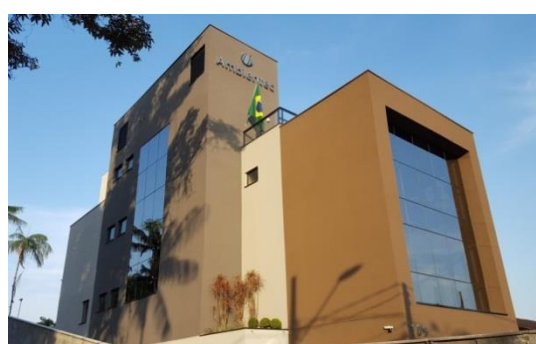


Figura 10: Edifício Comercial de 3 pavimentos construído em Joinville-SC, pela TECVERDE. fonte: TECVERDE

A produção de estruturas em Madeira Laminada Colada no Brasil já tem mais de 60 anos, com empresas atuando no mercado de construções industrializadas de madeira desde os anos 1950, como a Esmara. Nas últimas décadas porém, outras empresas passaram a produzir Madeira Laminada Colada no Brasil, utilizando basicamente Pinus ou Eucalipto na Produção. Mais recentemente começou a ser produzido no Brasil o CLT (Madeira Laminada Colada Cruzada), que também teve algumas importações realizadas nos últimos anos.

O levantamento da produção de Madeira Laminada Colada no Brasil é apresentada a seguir:

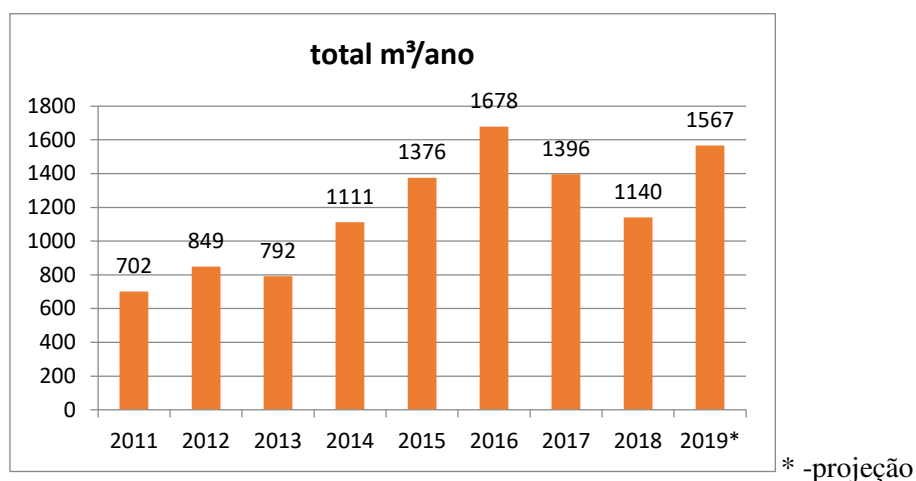


Figura 11: Produção de Madeira Laminada Colada no Brasil nos últimos 6 anos

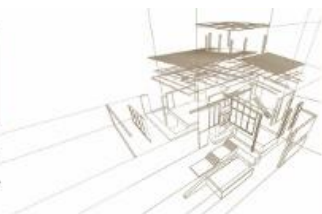


Figura 12: Casa Folha, Construída em Angra dos Reis - RJ – MLC da ESMARA

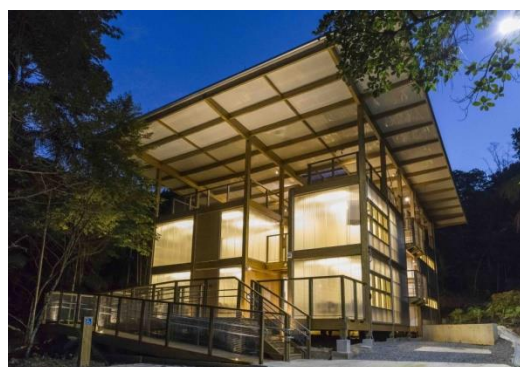


Figura 13: Edifício da Fundação Florestal em Peruíbe-SP – MLC da REWOOD. Fonte: site REWOOD



Figura 14: cobertura de quadra em São Paulo – SP – MLC da CROSSLAM. Fonte: site CROSSLAM



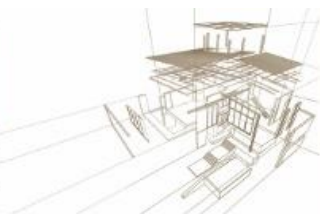
Figura 15: Casa do Sítio construída em MLC e woodframe em São Marcos-RS pela COMETA. Fonte: site COMETA



Figura 16: Moradias Estudantis da Fundação Bradesco em Canuanã-TO, construída em Madeira Laminada Colada pela ITA Construtora. Fonte: archdaily

5. CONCLUSÕES

Os dados apresentados pelas indústrias indicam um claro crescimento do número de construções em woodframe no Brasil, bem como um aumento na produção de Madeira Laminada Colada e na introdução de novos produtos engenheirados como o CLT e o



LVL. Ressalta-se que o Brasil vem passando por um período de crise na construção civil, o que é sensível nos gráficos de produtividade, que indicam uma interrupção do crescimento nos anos de 2016 e 2017, que estão sendo retomados pela projeção de produção do ano de 2019.

A produção de madeira no Brasil apresenta recordes de produtividade devido às características de solo e clima, proporcionando grande disponibilidade de madeira, em especial as madeiras de reflorestamento, que atualmente são utilizadas na produção dos produtos engenheirados. Com a demanda crescente de matéria prima para esses produtos, estima-se que a indústria investirá na produção de madeiras apropriadas para as finalidades de produção de woodframe, MLC, CLT e LVL.

Em vista do caráter inovador de sistemas construtivos com madeira engenheirada no Brasil, e do número crescente das novas tecnologias de proteção em desenvolvimento com potencial de uso em madeiras nos sistemas construtivos, é da maior importância para a consolidação deste mercado da construção civil, o desenvolvimento de um maior número de informações acerca dos organismos xilófagos, como espécies e distribuição no Brasil, além de que será também imprescindível considerar a preparação de profissionais especializados para o atendimento de futuras demandas tanto na área de projetos quanto de manutenção desses sistemas construtivos.

Como consequência do aumento de demanda para essas construções, algumas empresas que fornecem produtos complementares, como ligações, impermeabilizações e acabamentos para a madeira tem investido no mercado brasileiro, proporcionando disponibilidades de materiais e de tecnologias que viabilizam a aplicação de novas tecnologias.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997, 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho, Rio de Janeiro, 2013a.

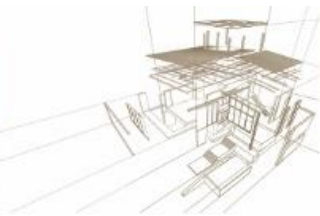
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16143**: Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso, Rio de Janeiro, 2013b, 19p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 5 – EN 1995-1-1** – Design of timber structures, Brussels, 1993.

Lelis, A.T. (coord.), Brazolin, S., Fernandes, J.L.G., Lopez, G.A.C., Monteiro, M.B.B. & Zenid, G.. Biodeterioração de madeiras em Edificações. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001. Publ. IPT N° 2686. 2001. p. 54

MINISTÉRIO DAS CIDADES, (PBQP-H), **SINAT Diretriz n° 005** Diretriz para avaliação técnica de sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Wood Framing*”). Brasília, 2016.

SILVA, G.A., 11 ago.2016. 16 slides. Material apresentado na 25ª Assembleia Geral Ordinária da Associação Brasileira de Preservadores de Madeira



SISTEMAS ESTRUCTURALES APLICADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES DE MEDIANAS LUCES EN MADERA ROLLIZA

STRUCTURAL SYSTEMS APPLIED IN THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS WITH MEDIUM DISTANCES BETWEEN SUPPORTS WITH ROUNDWOOD

Lozano P, Jorge E ⁽¹⁾*, Guerra Andrés F⁽²⁾

(1) Profesor asociado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C., Colombia

(2) Ing. Civil, Mg. en Construcción. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia

* Contacto: jelozanop@unal.edu.co

Resumen

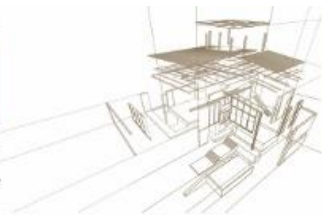
El ejercicio del arquitecto en las regiones rurales es poco usual y casi ausente en las comunidades indígenas, por lo que se hace necesario tratar de establecer una metodología de diseño arquitectónico, que facilite respuestas espaciales que respeten las tradiciones, la cultura e identifiquen su cosmogonía. El acercamiento y convivencia con estas comunidades son factores predominantes para entender su entorno social, productivo y su relación con el medio ambiente. La morfología estructural de la edificación debe buscar la eficiencia en la distribución de las cargas para optimizar las secciones de cada elemento que compone la estructura y es una alternativa que tiene el arquitecto para utilizar los materiales que dispone teniendo en cuenta sus características dimensionales y las propiedades físico mecánicas. En el desarrollo del documento se describe la cultura wayúu para entender su cultura, cosmogonía, tradiciones y relaciones con el territorio y el medio ambiente, luego se muestra el proceso metodológico del diseño arquitectónico aplicando la teoría del IAP (Investigación, Acción, Participación), después se analiza el comportamiento de las enramadas construidas para optimizar los detalles de la nueva propuesta y posteriormente se plantea y desarrolla de la propuesta caracterizando previamente las propiedades físico mecánicas del trupillo.

Palabras-clave: Morfología estructural, madera rolliza, construcción.

Abstract

The architect's practice in rural areas is unusual and almost absent in indigenous communities, so it is necessary to try to establish an architectural design methodology that brings spatial responses that respect traditions, culture and identify their cosmogony. The approach and coexistence with these communities are predominant factors to understand their social, productive environment and their relationship with the environment. The structural morphology must seek efficiency in the distribution of loads to optimize the sections of structural elements and is an alternative that the architect has to use the available materials including their dimensional characteristics and physical-mechanical properties. In the development of the document the Wayúu culture is described to understand its culture, cosmogony, traditions and relations with the territory and the environment, then the methodological process of the architectural design is shown applying the theory of the IAP (Investigation, Action, Participation), then, the performance of the enramadas built to optimize the details of the new structure is analyzed and the proposal is presented and developed, previously researched the physical mechanical properties of the trupillo.

Keywords: Structural morphology, wood, construction.



1. INTRODUCCIÓN

El propósito de la presente investigación es optimizar el sistema estructural en la construcción de edificaciones comunitarias Wayúu con luces de ocho metros y una área de 80 metros cuadrados en madera rolliza de 2.0 metros de longitud y diámetros de 0,10 metros con trupillo (*Prosopis juliflora*) en la alta Guajira. Se inicia con la caracterización de las propiedades físico mecánicas del trupillo (*Prosopis juliflora*) para determinar su resistencia estructural luego, se determinó la resistencia de las unión propuesta para evaluar su comportamiento. Se modeló y comparó el sistema estructural planteado con dos (2) edificaciones comunitarias construidas para comparar, comprobar su comportamiento, eficiencia y respuesta estructural.

2. METODOLOGÍA

El Trupillo (*Prosopis juliflora*), despierta el mayor interés y expectativas por sus múltiples usos en el campo industrial por la producción de goma arábica, galactomanas, antígenos, carbón activado, etc., especie que debe ser objeto de exhaustiva investigación porque en un futuro puede contribuir a la generación de divisas para el Departamento (Veja y Fernández 2010).

Las ventajas de utilizar el trupillo como material local es el conocimiento que tiene la comunidad del material, su menor costo y la facilidad de obtenerlo. Como desventaja tiene su corta longitud y la irregularidad del tronco , en la figura 1 se observa el uso más común.



Figura 1: Utilización del trupillo

2.1. Caracterización Botánica

2.1.1. Clasificación taxonómica

Nombre científico: *Prosopis juliflora* (Sw.) DC.

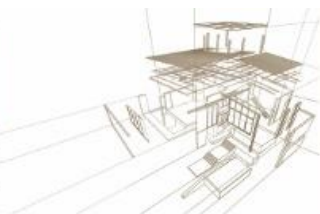
Familia: Fabaceae

Sinónimos: *Mimosa juliflora* Sw.

Nombres comunes: Trupillo, cují, trupí, algarrobo, payandé, mesquite, romero, mancaballo argentino

2.1.2. Descripción botánica

Tronco – Corteza: árbol de 6 a 15 m de altura. Tronco torcido, espinoso, corto y muy ramificado. La corteza es áspera, acanalada, de color gris o castaño.



Copa – Hojas: Copa amplia y extendida. Hojas compuestas, alternas, bipinnadas, con 1 a 3 pares de pinnas, cada una con 12 a 25 pares de folíolos oblongos.

Flores – Frutos: Inflorescencias en espigas axilares, olorosas, con flores amarillo verdosas. Fruto tipo legumbre, arqueado o recto, de color amarillento, cada uno con 10 a 20 semillas duras.

Condiciones de plantación: En el manual de árboles (Trujillo, 2003) las condiciones de plantación recomendadas son: altitud: 0 a 1500 msnm, clima: Temperatura media 27°C, pluviosidad: 0 a 200 mm. Es adecuado para zonas áridas y necesita mucha luz solar.

2.1.3. Propiedades organolépticas

Color: Albura de color amarillo (2.5Y 8/8), con transición abrupta al duramen de color marrón rojizo brillante (5YR 5/6)

Veteado: Líneas vasculares, ver figura 43

Olor: No distintivo

Lustre: Brillante



Figura 2: Veteado *Prosopis juliflora*

2.1.4. Propiedades macroscópicas

Anillos de Crecimiento: Visibles a simple vista, definidos por bandas de parénquima

Vasos: Poros visibles a simple vista; solitarios y arracimados de 2-3 poros, en proporciones similares; porosidad difusa, sin orientación; en el duramen se encuentran ocluidos por gomas oscuras. Líneas vasculares visibles a simple vista

Parénquima axial: Visible a simple vista, de tipo vasicentrico confluyente que forma bandas continuas.

Parénquima radial: Visible con aumento de 10x tanto en el plano transversal como en el tangencial. Estratificación ausente.

Otras estructuras: Ausentes

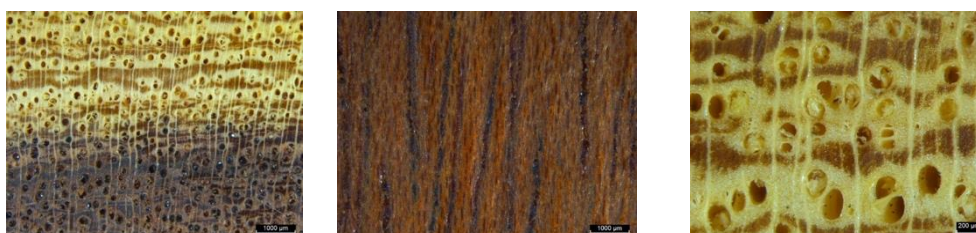
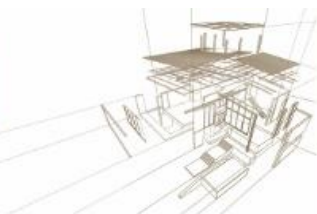


Figura 3: a) Corte transversal 10X,; b) Corte tangencial 10X, c) Corte transversal 50X



2.2. Propiedades físicas

2.2.1. Propiedades físicas según literatura

Estudios realizados por (Lastra 1982) se obtienen los siguientes datos:

Densidad básica: 0,72 g/cm³

Contracción Radial: 1,35%

Contracción Tangencial: 2,70%

Contracción Volumétrica: 4,20%

Relación CT/CR: 2,00

Módulo de ruptura: 1107 kg/cm²

Módulo de elasticidad: 109000 kg/cm²

Compresión Paralela: 794 kg/cm²

Compresión Perpendicular: 126 kg/cm²

Dureza en los lados: 956 kg/cm²

Tenacidad: 0,53 kg-m/cm²

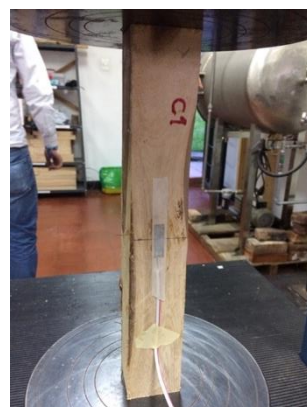
2.3. Ensayos de laboratorio

2.3.1. Ensayo de tracción paralela a la fibras

Se elaboraron 15 probetas para el ensayo de tracción paralela a las fibras de acuerdo a la norma NTC 3377. Las probetas T4 y T6 fallaron en zona diferente a la requerida siendo rechazadas. Con las otras 13 probetas se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla:

Tabla 1: Análisis estadístico de los resultados esfuerzo último a tracción

Esfuerzo último promedio (MPa)	70.37
Desviación estándar S (MPa)	15.76
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=13 datos) =	2.09
Mínimo aceptable=	37.43
Máximo aceptable=	103.31
Coefficiente de variación (%) =	22.39%
Percentil 5% =	43.72
Valor característico (MPa)=	36.38



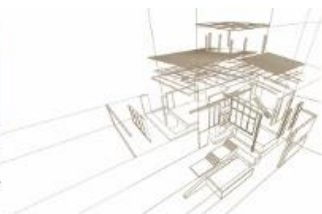


Figura 4: a) Ensayo tracción; b) Ensayo compresión; c) Ensayo flexión

2.3.2. Ensayo de compresión paralela a la fibras

Se elaboraron 13 probetas para el ensayo de tensión paralelo a la fibra de acuerdo a la norma NTC 3377 y la velocidad de la carga de acuerdo a la norma ASTM D198, la probeta C1 no tuvo en cuenta por falla del deformimetro electrico siendo rechazada. Con las otras 12 probetas se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla:

Tabla 2: Análisis estadístico de los resultados esfuerzo último a compresión

Esfuerzo último promedio (MPa)=	30.26
Desviación estándar S (MPa)=	4.84
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=12 datos) =	2.05
Mínimo aceptable=	20.32
Máximo aceptable=	40.20
Coefficiente de variación (%) =	16.02%
Percentil 5% =	22.59
Valor característico (MPa)=	19.77

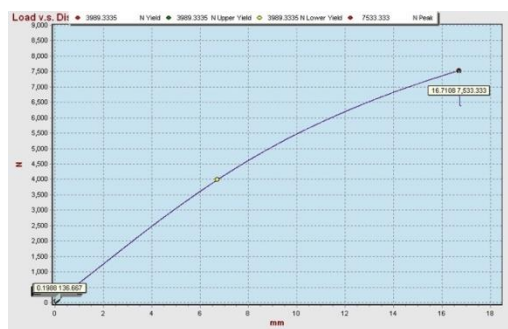
2.3.3. Ensayo de flexión

Se elaboraron 11 probetas para el ensayo de tensión paralelo a la fibra de acuerdo a la norma NTC 3377 y la norma NTC 663, con las 11 probetas se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla 8:

Tabla 3: Análisis estadístico de los resultados esfuerzo último a flexión

Esfuerzo último promedio (MPa)=	63.94
Desviación estándar S (MPa)=	11.58
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=11 datos) =	2.01
Mínimo aceptable=	40.65
Máximo aceptable=	87.23
Coefficiente de variación (%) =	18.12%
Percentil 5% =	44.13
Valor característico (MPa)=	37.62

2.3.4. Módulo de elasticidad NTC 3377 y NTC 663



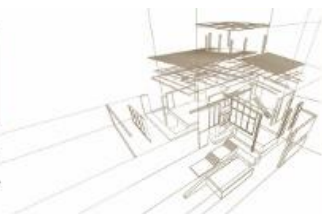


Tabla 4: Análisis estadístico de los resultados Módulo de Elasticidad

Modulo de elasticidad promedio (MPa)=	7197.73215
Desviación estandar S (MPa)=	837.579703
Datos atipicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=11 datos) =	2.01
Minimo aceptable=	5514.19694
Maximo aceptable=	8881.26735
Coefficiente de variación (%) =	11.64%
Percentil 5% =	5990.18233
Valor caracteristico (MPa)=	5422.71883

2.3.5. Diferencia de resultados

Los valores obtenidos de los ensayos de laboratorio son inferiores a los de la literatura como se puede comparar en la tabla 10.

Tabla 5. Comparacion de valores de resistencia Lastra vs. Valores de resistencia obtenidos

ENSAYO	LITERATURA	LABORATORIO	DIFERENCIA %
TRACCIÓN PARALELA		36.38 MPa	N. A.
COMPRESIÓN PARALELA	79,4 MPa	19.77 MPa	75.1
FLEXIÓN		37.62 MPa	N. A.
MÓDULO ELÁSTICO	10900 MPa	5422.72 MPa	50.25
RESISTENCIA AL PERNO		4000 Kg	N. A.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Modelos estructurales de las propuestas planteadas con respecto a las construidas

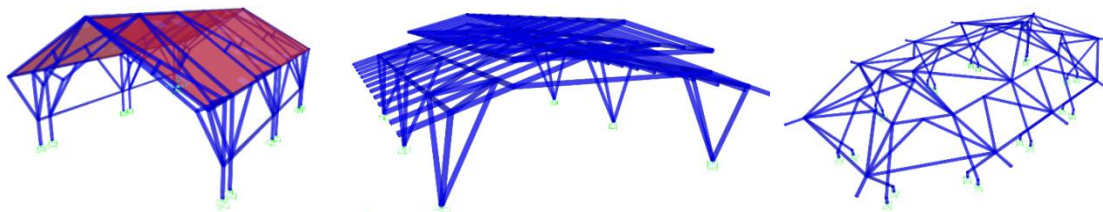


Figura 5: a) Enramada propuesta b) Enramada Ichien c) Enramada Jashumana

3.2. Comportamiento a la deflexión

La que presenta mayores deflexiones es la enramada de Ichien y las enramadas de Jashumana y la enramada propuesta tienen un mejor comportamiento a las deformaciones admisibles que exige la norma NSR-10, debido a que la longitud de cada elemento es menor a dos metros lineales. En las figuras 66 y 67 se observa el comportamiento.

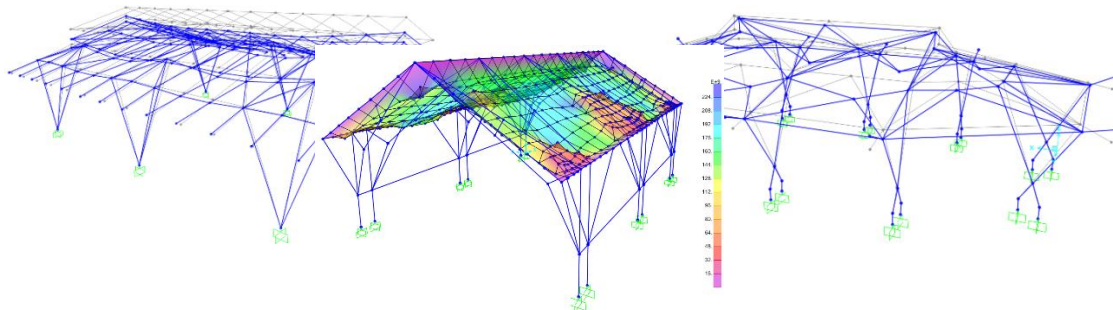
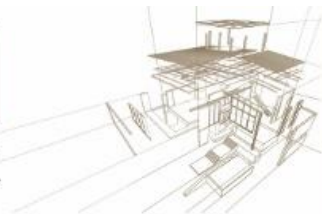


Figura 6: a) Enramada de Ichien b) Enramada de Jashuman c) Enramada propuesta

3.3. Comportamiento para cargas axiales

La que presenta mayores valores para cargas axiales específicamente compresión es la enramada propuesta debido a que madera de trupillo tiene una mayor densidad.

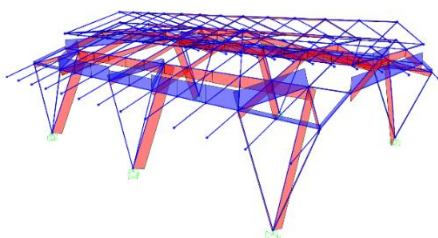
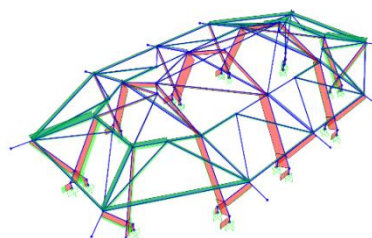
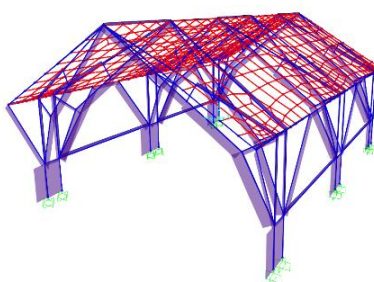


Figura 7: a) Enramada de Ichien



b) Enramada de Jashumana



c) Enramada propuesta

Tabla 6: Tabla comparativa valores cargas axiales

Carga axial	Propuesta	Ichien	Jashumana
Compresión	0,82 KN	26,56 KN	5,88 KN
Tracción	4.45 KN	27,79	8,93 KN

3.4. Comportamiento del momento flector



La enramada propuesta es la que presenta los menores valores de momento flector con respecto a las enramadas de Ichien y Jashumana.

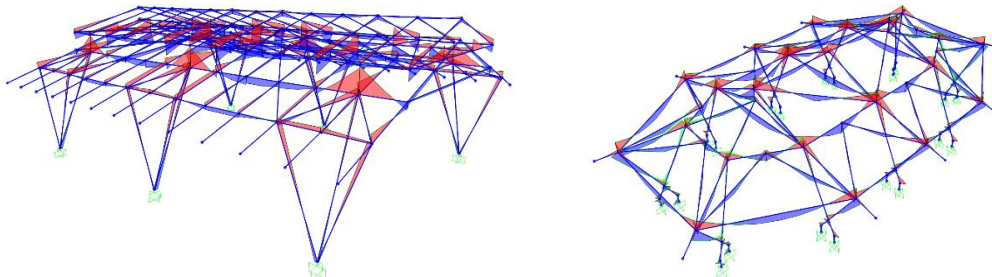
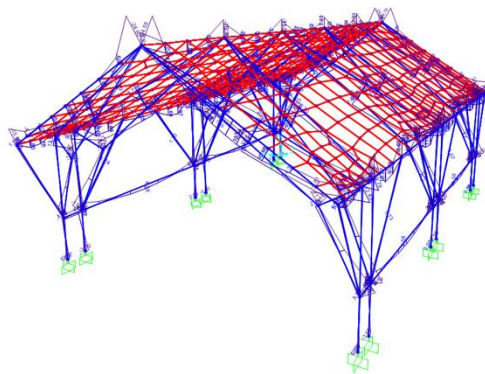


Figura 8: a) Enramada de Ichien

b) Enramada Jashumana



c) Enramada propuesta

Tabla 7: Comparativa valores momento

Momento	Propuesta	Ichien	Jashumana
Positivo	0,1367 KNm	2,02 KNm	1,69 KNm
Negativo	0,2437 KNm	3,27 KNm	1,82 KNm

3.5. Comportamiento ante corte

La enramada que presenta mayores valores de corte es la enramada de Ichien, la enramada de Jashumana tiene valores mayores de corte a la enramada propuesta.

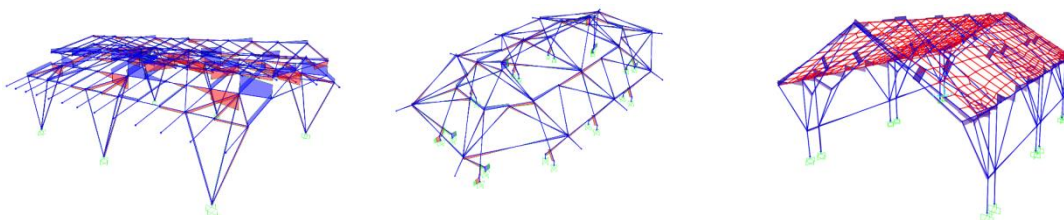


Figura 9: a) Enramada de Ichien b) Enramada de Jashuman c) Enramada propuesta

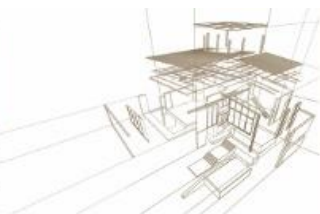


Tabla 8: Tabla comparativa valores cortante

Cortante	Propuesta	Ichien	Jashumana
Corte	0,91 KN	6,48 KN	3,014 KN

4. CONCLUSIONES

Aunque la enramada propuesta no se ha construido se puede verificar que, con la utilización de los modelos digitales es viable la construcción de una enramada con una luz de ocho metros con madera de la región.

La morfología estructural independientemente del material determina que las cargas se distribuyan de forma eficiente logrando que los diferentes elementos que componen la estructura tengan menores secciones y en consecuencia menor peso propio.

La utilización de materiales regionales con características geométricas particulares de su entorno natural como diámetro, longitud no son impedimento para realizar estructuras en madera de medianas luces.

AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros integrantes del Grupo de Investigación Madera y Guadua de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogota D. C., Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials (2015). Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. ASTM D198. Pensilvania, USA

Lastra Rivera, J. A. (1982). Compilación de las propiedades físico-mecánicas y usos posibles de 172 maderas de Colombia.

Lozano, J.(2017). Optimización de sistemas estructurales aplicados en la construcción de edificaciones de medianas luces en madera rolliza trupillo (*Prosopis juliflora*) en la alta Guajira Colombia. Magíster. Disertación. Concepción, Universidad del BioBio, Chile.

Norma Técnica Colombiana (1973). Maderas. Determinación de la resistencia a flexion. NTC 663. Bogotá D. C.

Norma Técnica Colombiana (1992). Maderas. Ensayos con probetas pequeñas. NTC 3377. Bogotá D. C.

Trujillo, E. (2010). Manual de Árboles. Investigaciones Forestales. Bogotá, Colombia.

Veja, J. R. R., & Fernández, M. I. M. (2010). Farmacopea guajira: el uso de las plantas medicinales xerófitas por la etnia wayuu. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 41, 1–10.