



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 THE CITY OF BOGOTA

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: dsperezc@unal.edu.co

CÓDIGO: 4608716

Resumen

Los materiales tienen propiedades físico mecánicas intrínsecas a su naturaleza y estas siempre se han considerado positivas o negativas según sus usos más extendidos. 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 fenómeno de 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 el laboratorio, y se reportó su deformación con base a la curvatura radial generada, la velocidad de respuesta de la deformación, la uniformidad de esta, la presencia de delaminación y la recuperación de la condición inicial.

Palabras-clave: Materiales responsivos, Compuesto de dos capas, expansión higromórfica de la madera, biomímesis.

Abstract

The materials have physical-mechanical properties intrinsic to their nature and these have always been considered positive or negative according to their most widespread uses. In terms of structural applications in construction, wood has large dimensional variations due to moisture changes which can generate internal stress in the structures, this is considered a disadvantage in this area. This phenomenon of 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, there were manufactured several test pieces composed of commercially available wood natural species, with an adhesive interface; 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, the uniformity of the deformation, the presence of delamination and the recovery of the initial condition.

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.

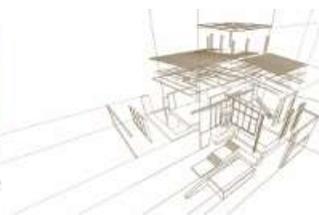
Esta investigación caracterizó el comportamiento higromórfico de un bicapa en madera que responde de manera pasiva a la humedad del ambiente con deformaciones programadas bajo las variaciones de humedad relativa encontradas en la ciudad de Bogotá. Para tal fin se fabricaron probetas compuestas de especies 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.

| | | |
|-------------------|--------------------------------|--|
| A que se responde | Al usuario | Necesidades funcionales Necesidades de Confort |
| | Estímulos externos/ambientales | Fuerzas externas Temperatura Asoleacion Humedad |
| Como se responde | De manera activa | Respuesta activada por el usuario Respuesta activada por sistemas automáticos |
| | De manera pasiva | Respuesta desde el mismo subsistema |

Figura 1 Clasificaciones en Arquitectura Responsiva

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 higroexpansión 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 3).

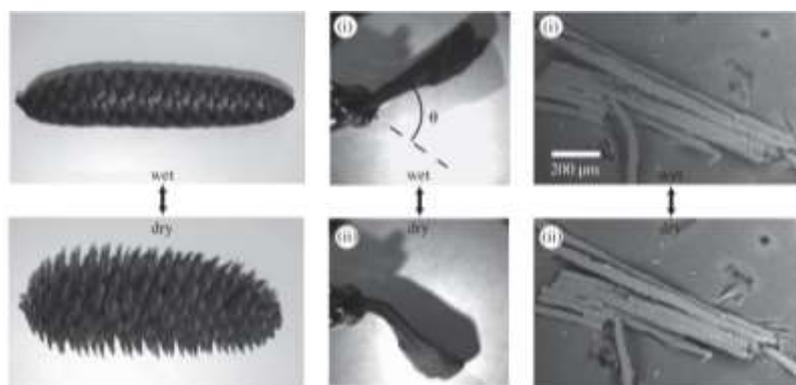
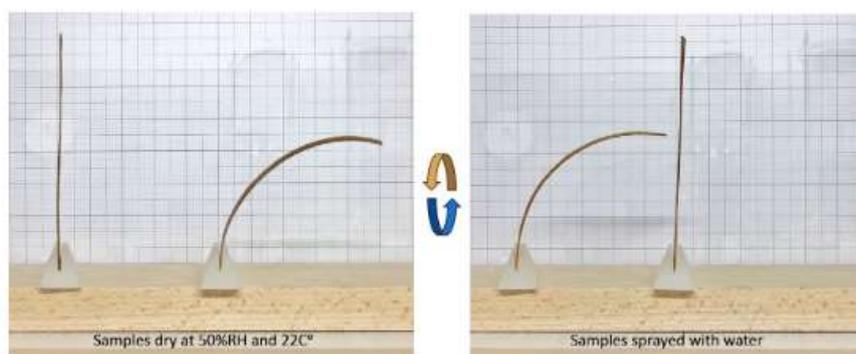


Figura 2 Comportamiento higromórfico de las piñas de pino a nivel de órgano, tejido y celular.

Fuente: *Hygromorph: from pine cone to biomimetic bilayers* [5]



Con base a esta observación adaptan la teoría de termostatos bimetalicos 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.



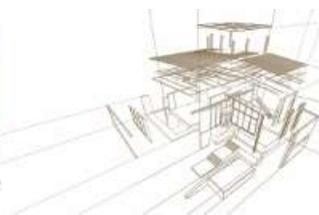
*Figura 3 Respuesta de las muestras rociadas con agua.
Fuente: Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture [11]*

4. CONDICIONES DEL ESTUDIO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

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 higroexpansión 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.

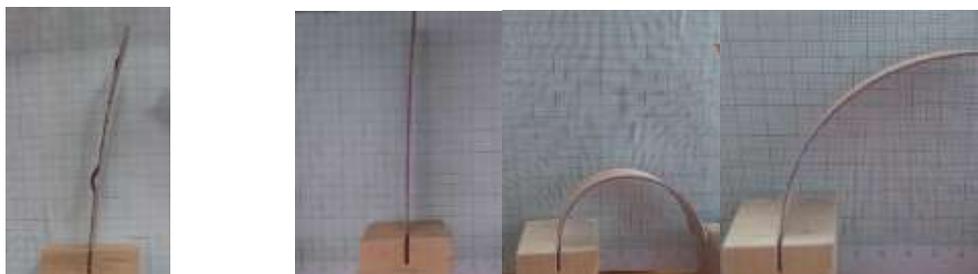


Figura 4 Presencia de delaminación (izq.) e incapacidad para recuperar la condición inicial (der.)
Fuente: Autor

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 expondrá a la humedad ambiente durante los ciclos de secado.

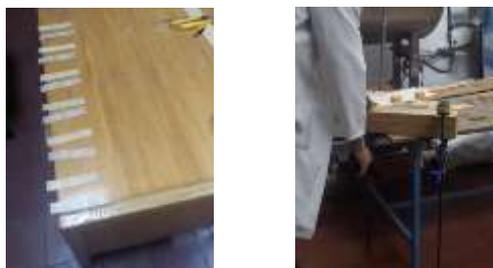


Figura 5 Fabricación y prensado de las probetas
Fuente: Autor

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.

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 grafica para medir deformación de las probetas (ver figura 7).



*Figura 6 Muestras a las 0 horas y a las 24 horas de exposición F
Fuente: Autor*

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.

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.

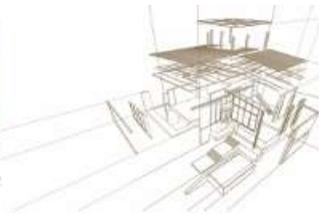


Figura 7 montaje ensayo de selección. Fuente: Autor

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

■ 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 reacciona de manera significativa al estímulo. Esto se debe a que el sentido longitudinal de la fibra es el que presenta menores coeficientes de higróexpansión, 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.

En cuanto a las fallas de las probetas, de 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 higróexpansión 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 una deformación uniforme y con una deformación ligera después de estar expuestos a 90% HR.

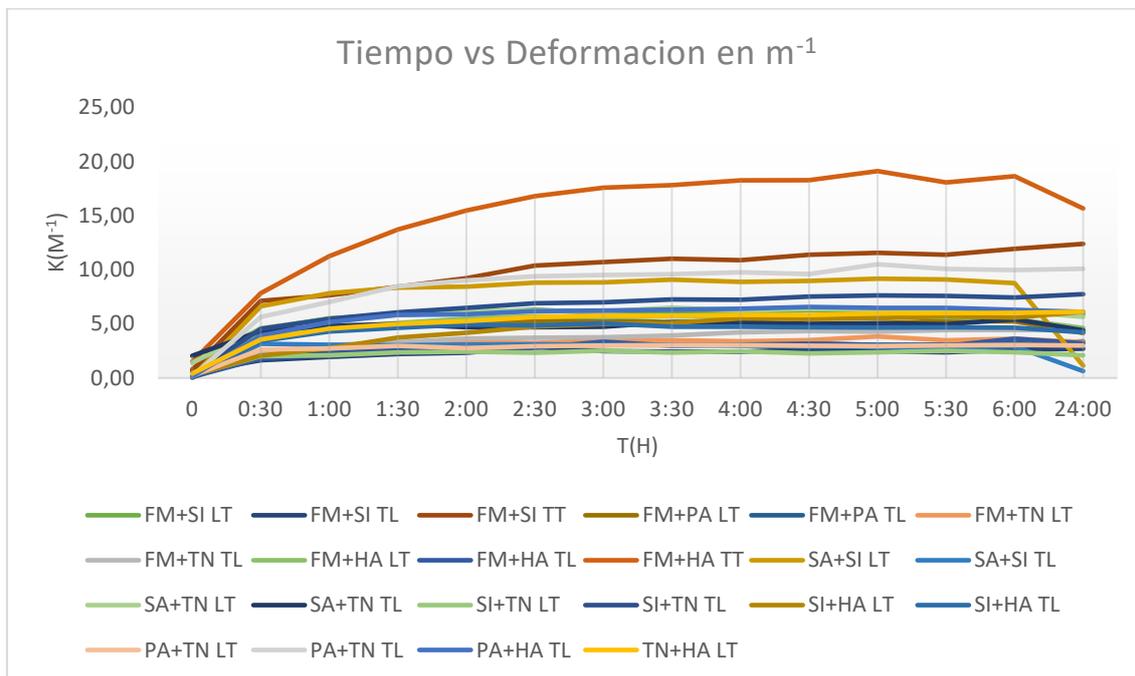


Figura 8 Probetas preseleccionadas (22 muestras) Fuente: Autor

■ 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.

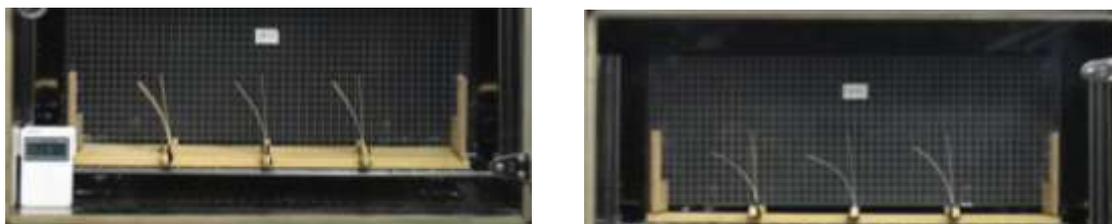


Figura 9 Comparación del estado inicial a la deformación máxima (FM+SY izq., FM+HA der.) Fuente: Autor

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 presentaros 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.

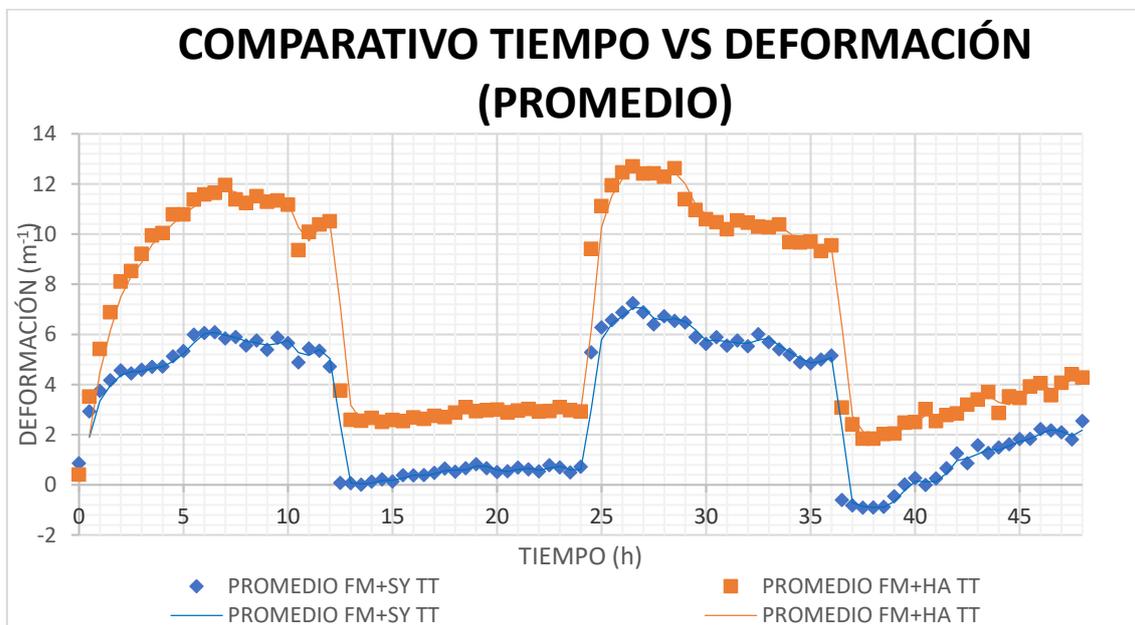


Figura 10 Comparación del comportamiento de las probetas Fuente: Autor

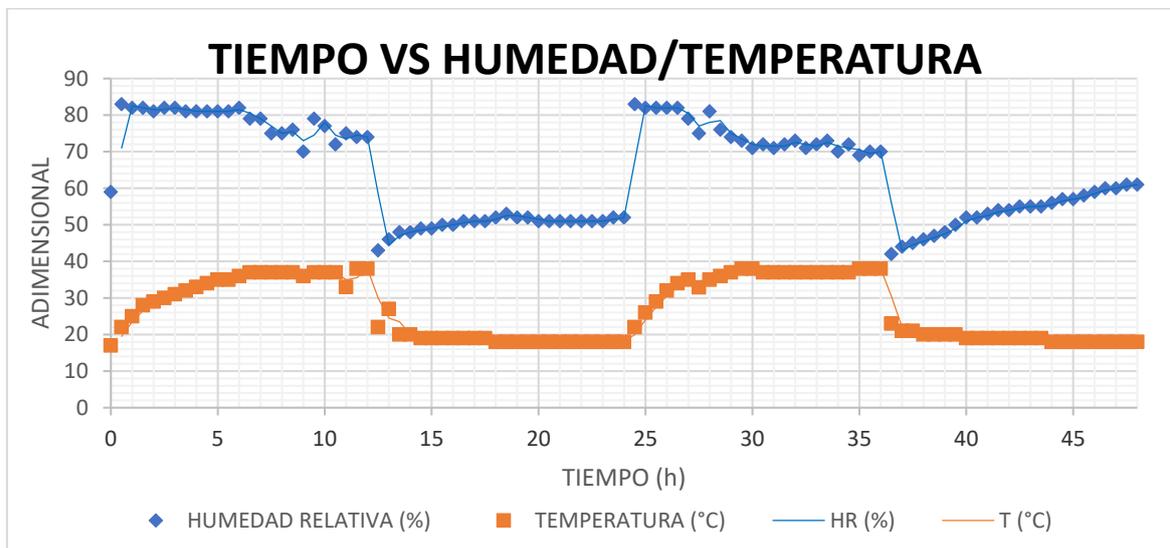
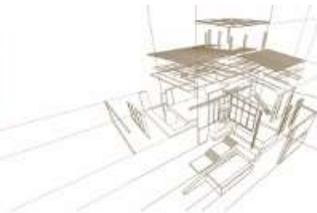


Figura 11 Condiciones de humedad y temperatura durante los ciclos Fuente: Autor

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 higroexpansión 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.