

The use of wood as Smart Building Material

El uso de la madera como Smart Building Material

KAREN STEPHANIE CANSIONG GUERRA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid
karenstephanie.cansiong.guerra@alumnos.upm.es

JOSÉ ESCOBAR AVILÉS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid
jose.escobar.aviles@alumnos.upm.es

One of the materials that plays a paper fundamental in the sector of construction in the wood, because to structure it has excellent properties mechanical that include high strength, good durability, high specific gravity and high moisture content. In the search for new sustainable materials with the environment, there is a need to look for new alternatives and intelligent construction systems, for which smart building materials are used and wood is one of them. The aim is to discover the new intelligent characteristics of wood and its use in construction. In addition to analyzing the progress in his research.

Wood, Sustainable, Construction, intelligent material

Uno de los materiales que juega un papel fundamental en el sector de la construcción es la madera, pues a nivel estructural tiene excelentes propiedades mecánicas que incluyen sus altos valores de resistencia, durabilidad, peso específico y contenido de humedad. En la búsqueda de nuevos materiales que colaboren con el medio ambiente, existe la necesidad de buscar alternativas y sistemas constructivos con materiales inteligentes y la madera es uno de ellos. El objetivo de este trabajo es descubrir las nuevas características innovadoras de la madera y su uso en el sector de la construcción, además de, analizar los avances en su investigación.

Madera, Sostenibilidad, Construcción, Materiale ininteligente

1. INTRODUCCIÓN

El Mercado de la Construcción continuamente está en búsqueda de versatilidad en materiales y en nuevas tecnologías que permitan aprovechar los recursos ya existentes. Bajo esta necesidad y con los continuos cambios climáticos surge la demanda de emplear materiales sostenibles, dentro de los cuales tenemos a la madera [1]. El desarrollo de nuevos sistemas de construcción que incorporan materiales con una capacidad de respuesta mecánica integrada es una rama de investigación parcialmente nueva. Dentro de esta rama están los materiales inteligentes [2]. En la reunión plenaria de Cesis (2004), Los científicos de materiales pronosticaron un papel preponderante de este material artificial en el futuro [2]. Actualmente, el termino de material inteligente está siendo empleado ampliamente, siendo así la madera uno de estos materiales. Este estado de arte enfatiza el empleo de la madera con esta nueva característica, dentro de las cuales tenemos: el efecto de memoria de forma, la higroscopicidad, la transparencia y el empleo de materiales monocromáticos en la madera termostrespuesta [2], [3], [4], [5].

El efecto de memoria de forma presente en la madera fue detectado en muestras de madera a principios de los años setenta, donde se pudo observar que este material después de ser forzado a cambiar su forma podía recuperar su forma

inicial después de que se hayan recuperado las condiciones físicas originales [2].

La higroscopia, como la característica de la madera de absorber o perder humedad con el medio ambiente es conocida desde tiempos muy lejanos. Posiblemente hace 20 años se empezó a sacarle partido a esta característica con aplicaciones en la construcción debido a la necesidad de reducir las emisiones de carbono y de consumo de energía en los edificios. Aunque la infinidad de consideraciones de diseño sostenible indica una mayor investigación sobre enfoques de diseño, materiales y metodologías que permitan conseguir mejoras del rendimiento del edificio junto con los estándares de estética, económicos y de capacidad de construcción [3].

La madera transparente fue originalmente descubierta a principios de los años 1990 con el fin de facilitar la estructura celular y los estudios morfológicos de las especies de madera. Li et al. (1990) midió las propiedades físicas y descubrió la posibilidad de usar esta madera en el campo de la ingeniería. Combina el rendimiento mecánico con las funciones ópticas, Puede ser empleada en edificios inteligentes y la óptica estructural y fotónica. Presenta baja densidad aproximadamente 1.2 g cm⁻³, un 80% de transmisión óptica y más del 70% de neblina, buen rendimiento mecánico y posibilidad de modificaciones multifuncionales. Entre los retos que presenta está la mejora del rendimiento, la producción ampliada y el uso en aplicaciones avanzadas [4].

La madera termorrespuesta reversible inteligente con rendimiento hidrófugo se obtuvo depositando recubrimientos termorrespuesta modificados sobre superficies de madera. Recientemente nació el interés de desarrollar materiales inteligentes sensible a los estímulos, llegando a convertirse los materiales termocrómicos reversibles uno de los materiales más avanzados en materiales inteligentes debido a su rápida respuesta a la temperatura. La madera reutilizada ortodrómica reversible se desarrolló al descubrir sustratos de madera con películas transparentes. Su principal ventaja es que puede cambiar su color repetidamente con el cambio de temperatura sin destruir la textura natural de la madera; aunque la hidrofiliidad de la madera puede limitar su aplicación [5].

Hoy en día existe un amplio interés en la madera especialmente porque se encuentra presente a partir de recursos renovables, presenta una huella ecológica y energética baja, costos bajos y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, la tendencia de la madera a presentar cambios dimensionales inducidos por la humedad es considerada una deficiencia [3]. Se sigue fomentando la investigación y la posibilidad de materiales de construcción inteligentes habilitados por la sensibilidad a la humedad de la madera [3].

1.1. MADERA CON EFECTO DE MEMORIA DE FORMA

El efecto de memoria de forma permite que después de haber sido forzada a cambiar su forma, la madera puede restaurar su forma inicial luego que se recupere sus condiciones físicas originales [2].

El concepto de memoria de forma se viene investigando desde inicios de los años ochenta. Takemura (1973), empleaba un término semejante para indicarlo como un fenómeno puramente temporal y reológico. En la actualidad este proceso refleja la capacidad de la madera para reaccionar y restaurar el estado físico inicial determinado por su contenido de humedad y temperatura [2].

Este fenómeno se basa en la reconstrucción temporal de la nanoestructura de la madera bajo una aplicación de carga controlada al aumentar la rigidez de la madera en los procesos de secado o de enfriamiento y desaparece con la humectación o el calentamiento [2].

Dentro de este efecto podemos distinguir dos tipos:

- ◆ Memoria de Tensión
- ◆ Memoria de Estrés [2].

1.1.1. EFECTO DE MEMORIA DE TENSIÓN

La memoria de tensión depende de la deformación inicial de tal manera que, si la madera ha sido comprimida y tensada sucesivamente, está memorizará el tipo de carga que haya

sufrido [2].

Gorbacheva (2000) realizó experimentos en la madera aplicándole una carga y sometiéndola a flexión y compresión, del que obtuvo como resultado que durante el calentamiento el tamaño de la madera descargada aumenta primero y luego disminuye. Este comportamiento fue realizado a diferentes rangos de temperatura. En la siguiente imagen se puede apreciar de mejor manera el resultado del experimento [2].

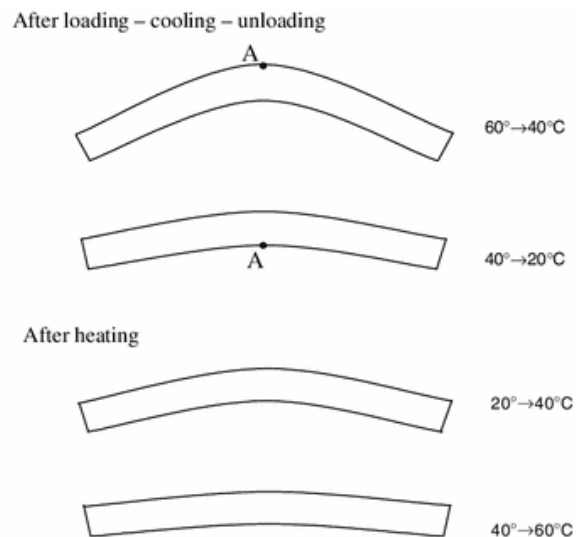


Fig. 1. Efecto de memoria de deformación de la madera. En "Wood as a natural Smart material", por Ugoley, BN 2014, Wood Science and Technology, Vol. 3, p. 553-56. Derechos de autor [2014] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

1.1.2. EFECTO DE MEMORIA DE ESTRÉS

El efecto de memoria de estrés fue descubierto en colaboración con EB Schedrina a finales de los años setenta (Ugoley et al., 1980) y se presenta durante la humectación o calentamiento de la madera inicialmente secada o enfiada bajo carga [2].

Es apropiado tener en consideración este fenómeno cuando la temperatura cambia, ya que la madera recuerda dicha temperatura al estar cargada. Además, permite predecir el comportamiento de la madera y el efecto de memoria de deformación [2].

En las siguientes imágenes se muestra un experimento en chapas de cenizas para comprender mejor este efecto. En este experimento, se procedió a doblar una muestra de calentamiento plano (se aplicó una carga) y luego se enfrió manteniendo dicha carga y después se descargó y se calentó nuevamente. Durante el proceso de enfriamiento, la forma de la muestra no cambia y el calentamiento hace que poco a poco vaya restaurando sus condiciones iniciales hasta recuperar su forma inicial [1].

1.2. HIGROSCOPICIDAD DE LA MADERA

La higroscopicidad es la capacidad de intercambiar humedad

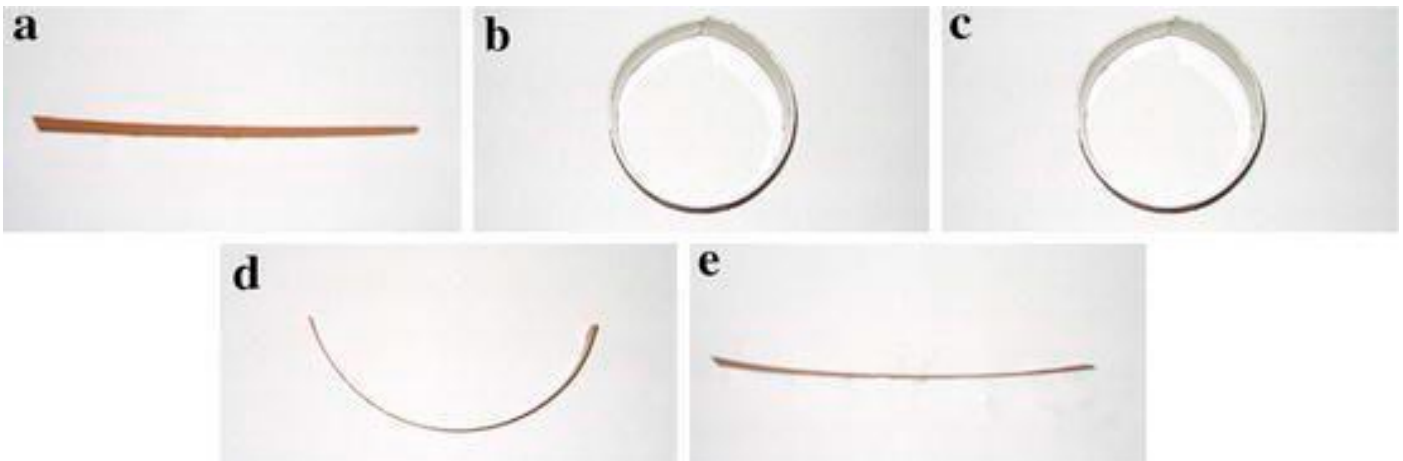


Fig. 2. Cambio de forma de chapa de ceniza y efecto de memoria de tensión a. Estado original (Madera calentada); b. Bajo Carga; c. Después del enfriamiento; d. Después de la descarga (Memoria de Forma); e. Después del calentamiento. En "Wood as a natural Smart material", por Ugoley, BN, 2014, Wood Science and Technology, Vol. 3, p. 553-56. Derechos de autor [2014] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

con el entorno circundante mediante procesos de absorción y desorción. Es una característica de los materiales con estructuras porosas, entre los cuales se encuentra la madera [3]. El comportamiento higroscópico de la madera es de gran importancia para un correcto aprovechamiento del recurso en la fabricación de distintas industrias, ya sean para uso en interiores o exteriores, por lo que es importante determinar el efecto de las condiciones climáticas sobre el cambio de humedad y de forma de la madera. Este comportamiento está en función de la determinación del hinchamiento y contracción máxima de la madera y de la anisotropía [6]

La madera está expuesta a un rango de humedades relativas del aire entre un 30 a un 85% que equivale a un 7 a 18% de contenido de humedad de equilibrio [6].

Se distingue por los cambios dimensionales relativamente grandes que surgen de las variaciones en su contenido de humedad y una combinación de otras propiedades que incluyen bajo peso y flexibilidad [3].

En muchas especies de madera, la higroscopicidad del duramen (parte interior de la madera) es más pequeña que la de albura debido a la presencia de extractos tóxicos depositados durante su formación [3].

Las investigaciones actuales apuntan a un empleo de materiales higromórficos como sensores o en aplicaciones a gran escala como en cubiertas de edificios y techos de espacios semi – interiores; sin embargo, continúan los retos y oportunidades de integración de edificios y de posibles aplicaciones funcionales y estéticas dentro de los edificios [3].

Las consideraciones para futuras aplicaciones son el conocimiento existente y la investigación en curso sobre las propiedades de los materiales como el comportamiento sensible [3].

Existe un amplio campo de posibles aplicaciones en el campo de la construcción, entre las que se analiza como parte de la envolvente del edificio porque sirve como una barrera entre

el espacio condicionado interno y externo no condicionado. A pesar de que algunas funciones de la envolvente del edificio pueden ser realizadas por sistemas estáticos independientes de las condiciones ambientales transitorias y de la ocupación del mismo, la incorporación de este material puede permitir una interfaz sensible al clima y pasivamente dinámica [3].



Fig. 3. Modulo de revestimiento con una serie de paneles higromorfos cuadrados de 150 x 150 mm superpuestos en estado abierto y cerrado (1a y 1b) y Prototipo de un paraguas sensible con la superficie de la cubierta que comprende paneles triangulares con 7 tipos diferentes de capas activas en estado abierto y cerrado, respectivamente (2a y 2b). En "Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture, por Holstov.,Artem., Bridgens, Ben., Farmer, Graham 2015. Construction and Building Materials, Vol. 98, p. 570-582. Derechos de autor [2015] por Elsevier. Reimpresión autorizada.

La madera higroscópica puede proporcionar un control pasivo sobre el movimiento del aire a través de la cambiante porosidad de la piel del edificio. Ayuda a mantener el confort térmico en climas áridos a través de una ventilación natural mejorada en climas secos y cálidos o a través del empleo de sistemas en lo que la respuesta de los materiales se origina por condensación y evaporación. Puede aplicarse para detectar la humedad y controlar el intercambio de aire seco y humedad entre el ambiente externo e interno [3].

No son fotosensibles y pueden proyectarse para controlar la

iluminación y evitar el aumento de la ganancia solar [3].

La sensibilidad natural de la madera a la humedad brinda un diseño de sistema de construcción de baja tecnología y costo, mejora el confort físico y psicológico al variar la transmisión de luz y calor y el movimiento de aire mediante un tejido de construcción naturalmente dinámico. Entre sus inconvenientes se presenta la intensidad tecnológica de los edificios modernos, así como la eficiencia de los recursos que actualmente forma parte del debate sobre la sostenibilidad [3].

1.3. MADERA TRANSPARENTE

El rendimiento mecánico de la madera proviene del componente de celulosa. La madera originalmente no es transparente, por lo que ha sido un desafío extraordinario para la ciencia de los materiales lograr una madera transparente [4].

La madera transparente se descubrió a principios de la década de 1990 y obtuvo por primera vez con una estructura conservada para los estudios morfológicos correspondientes. Se puede emplear en edificios inteligentes y óptica estructural y fotónica. Entre los múltiples retos de este material se encuentra el rendimiento óptico y mecánico mejorado y las nuevas aplicaciones de funcionalización [4].

Se fundamenta en la interacción luz – madera ya que al viajar la luz a través del aire e interactuar con un objeto sólido, se propaga la luz en la dirección hacia adelante para la retracción y /o absorción o a su vez reflejarse hacia atrás en la interfaz aire / sólido [4].

Entre las propiedades ópticas de un material transparente se encuentra la transmitancia óptica total y la neblina óptica con una pequeña reflexión del 10% con espesor en la dirección longitudinal en la superficie exterior. La transmitancia óptica total es la relación de la intensidad de la luz transmitida a la intensidad de luz incidente y la neblina óptica es la proporción de luz transmitida difusa a la luz total transmitida. Entre estas dos propiedades pueden influir el índice de refracción, el grosor, la rugosidad de la superficie, la distribución del tamaño de los poros y la porosidad [4].

Cuando la luz interactúa con la madera genera una combinación de refracción, absorción, reflexión y transmisión. La dispersión de la luz tiene lugar en todas las interfaces entre la pared celular y el aire, pero dentro de la pared celular se puede conducir de una mejor manera esta dispersión debido a un desajuste del índice de refracción de los principales componentes químicos de la celulosa, hemicelulosa y lignina. La lignina representa el 80 a 95% de la absorción de luz. Esto depende de la longitud de la onda de la luz y la naturaleza de la madera como, por ejemplo: la densidad, las direcciones de la madera y las composiciones químicas. Las absorciones de luz de las entidades químicas deben reducirse o eliminarse para lograr que la madera sea transparente [4].

La densidad de la interfaz es mayor cuando la luz se propaga en la dirección transversal de la madera en comparación con la propagación a lo largo de la dirección longitudinal. La madera cuando la luz se propaga en el plano transversal presenta una mayor transmitancia y menor turbidez que cuando la luz se propaga en el plano transversal; esto debido a que tiene una menor densidad de interfaces de polímero /celulosa producto de la forma de cilindro hueco de las células de madera [4].

Las propiedades mecánicas de la madera transparente dependen en gran medida de las especies de madera y la anisotropía de la estructura de la madera como por ejemplo la madera transparente a base de álamo, haya y balsa impregnadas con el mismo polímero muestran grandes diferencias. Las propiedades de tracción mejoran al aumentar la fracción de volumen de celulosa y son anisotrópicas [4].

Para la fabricación y rendimiento de la madera transparente las propiedades de los polímeros son importantes, así como la viscosidad, refracción, compatibilidad con la pared celular y la contracción durante la polimerización [4].

Una ventaja de este tipo de madera es que la resistencia a la fractura es más alta que la de los materiales frágiles, por lo que no se rompe de manera desfavorable [4].

Un mayor contenido de celulosa es deseable en la madera transparente, pero para ello se requiere comprimir la estructura de la madera, por lo que aún no se ha descubierto si es factible para estructuras gruesas [4].

Los paneles de construcción de madera transparente tienen menor conductividad térmica, mejor resistencia al impacto y mayor densidad. Según estudios, un techo de madera transparente podría proporcionar una iluminación más uniforme y compacta durante el día [4].

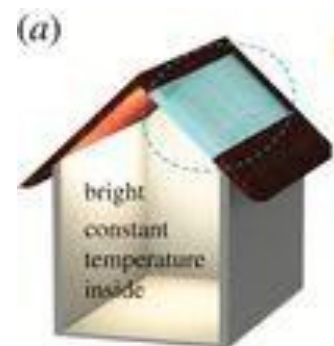


Fig. 4. Boceto de una casa con techo transparente. . En "Transparent wood for functional and structural applications por Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars 2018. Philosophical.

Esta madera no muestra una ganancia óptica intrínseca por sí misma, por lo que la adición de medios ópticos activos puede llevar a una amplia gama de aplicaciones [4]

Existen aún algunos desafíos por cumplir como es la mejora de las propiedades ópticas y mecánicas y ampliar los métodos

de producción ya que los procesos de deslignificación llevan mucho tiempo y debilitan la estructura de la madera, no siempre son ecológicos y la manipulación y fabricación de sustratos grandes se vuelve todo un reto. Para realizar la visión de las aplicaciones de nanotecnología de la madera a gran escala, la ciencia de los materiales a nanoescala debe desarrollarse para ser implementados a escala industrial [4].

1.4. MADERA TERMORRESPUESTA CON MATERIALES TERMOCRÓMICOS

La madera inteligente termorrespuesta fue desarrollada colocando materiales termocrómicos sobre superficies de madera. Este efecto consiste en que los compuestos de madera fabricados pueden cambiar de color de manera variable a diferentes temperaturas [5].

Según estudios realizados, los materiales termocrómicos se instalaron con éxito sobre superficies de madera. A medida que aumentan las concentraciones de materiales termocrómicos cambia el color de la madera [5].

Los materiales termocrómicos cambiantes se utilizan en muchos campos de aplicación, entre ellos están como sensores de temperatura, regulador térmico y en recubrimientos inteligentes. Por sus características de conmutación, el color de los materiales de madera termocrómicos con termocromismo reversible antidrómico puede cambiar frecuentemente de tal manera que se colorean a temperatura ambiente y se vuelven incoloros con un aumento de temperatura [5].

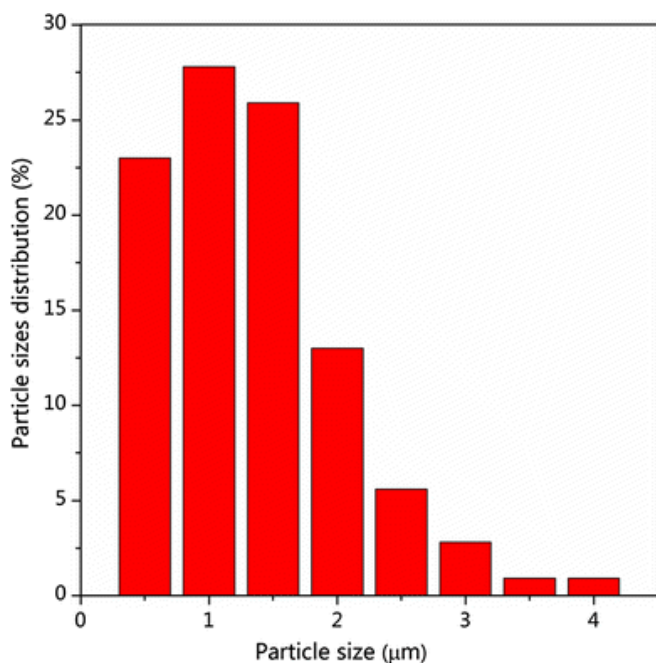


Fig. 5. Distribución del tamaño de partículas de materiales termocrómicos. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

Al ser la madera un material poroso se puede suministrar en distintos lugares los materiales termocrómicos. El porcentaje

de estos materiales puede ser desde 0, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 3.5 y 4%. Este tamaño de materiales fue analizado por el Nano Measurer, del que se obtuvo que de acuerdo al diagrama de inmersiones de partículas el tamaño de 0.5 a 1.5 µm tiene una mayor distribución de las partículas [5]

Se colocan en las superficies de madera utilizando un método de recubrimiento por caída y se colocan a temperatura ambiente durante 24 horas para que se sequen naturalmente. Puede cambiar los colores entre el color de la madera original y un color oscuro según la temperatura; es decir que se colorea cuando la temperatura aumenta y vuelve a su color natural cuando se enfría a temperatura ambiente. Las superficies de madera inteligente termorrespuesta se obtienen con un espesor de 12 µm [5].

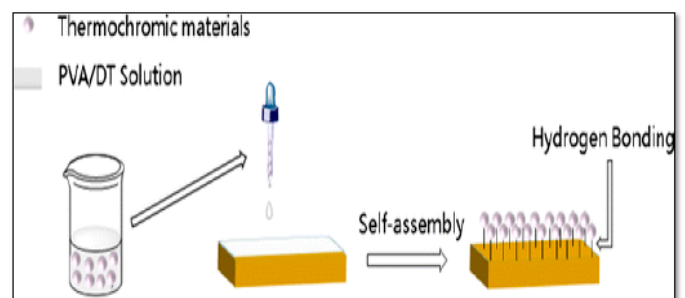


Fig. 6. Estrategia experimental para la fabricación de madera inteligente termorrespuesta. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

La colocación de los materiales termocrómicos le brindan a la madera una superficie homogénea y lisa, aunque una de las principales limitaciones es que la textura de la madera sufre una gran pérdida [5].

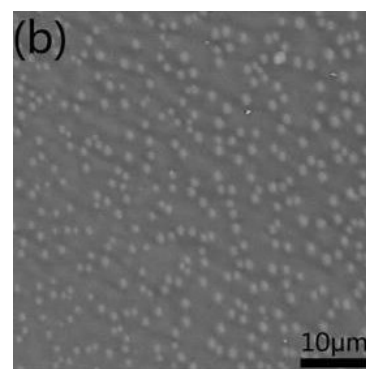


Fig. 7. Superficie de madera de respuesta térmica inteligente. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

2. RESULTADOS

La madera es un biopolímero natural y renovable con excelentes propiedades como el aislamiento térmico y acústico,

ajuste de la humedad y temperatura y una alta proporción de resistencia al peso; lo que contribuye a que sea empleado en edificios, decoraciones, entre otros usos [7].

Al poseer una pared celular porosa le brinda a la madera una superficie capaz de fusionar con otros tipos de materiales avanzados. [7].

En los últimos años los investigadores han realizado muchos experimentos que incorporan compuestos orgánicos e inorgánicos, los mismos que se mezclan con la madera para explotar la misma con funciones inteligentes [7].

La incorporación de la madera higroscópica cumple un papel importante dentro de los materiales y sistemas inteligentes de baja tecnología con funciones variables en la industria de la construcción. En el pasado, la higroscopicidad de la madera no se había aprovechado hasta los últimos años en los que se descubrió sus beneficios. Se descubrió que la madera atrae o retiene las moléculas de su entorno circundante consiguiendo que aumente de volumen a medidas que las moléculas de agua estén suspendidas entre las fibras de celulosa. Debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de cambiar el volumen mientras está sujeto a estrés, es un buen candidato para transformar los sistemas de construcción [3].

Holstov et al. utilizó el principio higromórfico que se basa en la capacidad del material para cambiar sus dimensiones en respuesta a la variación en la humedad, reducir ganancia de calor solar y el deslumbramiento en los edificios y regular la luz del día a través del control pasivo de la apertura y el cierre de las pantallas de fachada. Se realizó un prototipo de una fachada higromórfica que se programaba para abrirse en condiciones de clima húmedo en el cielo nublado para dejar pasar más la luz del día y cerrar en condiciones secas bajo un cielo despejado. En este caso la propiedad higroscópica de la madera se empleó para desarrollar un recubrimiento arquitectónico que responde a los cambios en rango de humedad [8].

En el caso de la madera transparente, está se obtiene cortando madera de haya en forma de disco, la cual previamente debe ser enjuagada con agua; después de esto es llevado a un horno de caja para la deshidratación a 120°C durante 24 horas. Luego de este periodo de tiempo las muestras deshidratadas se transfieren a una solución que contiene el 5% de cloruro de sodio en peso en solución de acetato dejando reposar a 95°C durante 12 horas. Todo este proceso blanquea la madera y elimina la lignina presente en las paredes celulares. Después de esto, las piezas de madera se lavaron con agua desionizada y más tarde en etanol y acetona. Esta muestra lavada se conoce como madera deslignificada debido a que la muestra va cambiando de color marrón a blanco. Posterior a esto, se almacena en etanol, humedeciéndolo con poli metacrilato de metilo (PMMA) por infiltración al vacío durante una hora con tres repeticiones. Finalmente, se empareda entre portaobjetos de vidrio

envueltos en aluminio para el tratamiento térmico realizado en un horno de caja a 85°C durante 12 horas y se obtiene la madera tratada térmicamente o también conocida como madera transparente [9].

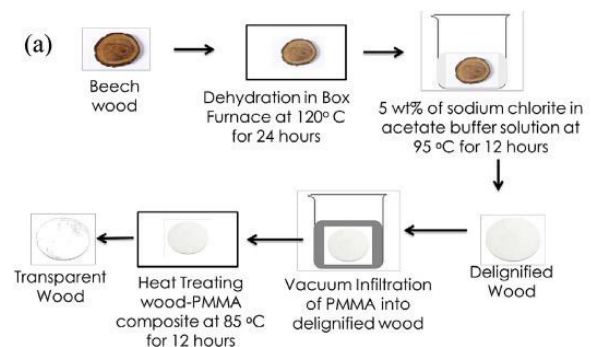


Figure 8. Proceso de fabricación de madera transparente. En "Transparent wood for functional and structural applications por Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars 2018. Philosophical Transactions of the Royal Society A- Mathematical Physical and Engineering Sciences, Vol. p. 376, 2112. Derechos de autor [2018] por Royal Society. Reimpresión autorizada.

Gracias a la madera transparente se puede reducir el consumo de electricidad en los edificios. La eliminación de la lignina de la madera y la absorción de polímeros inofensivos consiguen que el índice de refracción del medio ambiente coincida con el índice de refracción de la pared celular. La morfología de la superficie de la madera transparente se ha estudiado mediante microscopía electrónica de barrido. Las mediciones ópticas demostraron una transmitancia óptica máxima del 70% y una turbidez máxima del 49% para muestras de madera de 0.1 mm y 0.7 mm de espesor. A través de las pruebas mecánicas se ha descubierto que tiene una mayor resistencia a la tracción y dureza. Es un probable candidato para materiales de construcción que transmiten luz y ventanas de células solares transparentes [9]

Dentro de las líneas de investigación de madera con materiales termocrómicos los investigadores están tratando de resolver el problema de pérdida de textura a través de una composición de estos materiales con alcohol polivinílico (PVA) y dextrina (DT). El PVA es un polímero tolerante con el medio ambiente, tiene una buena solubilidad en agua y una excelente propiedad de formación de películas y la DT ayuda a mejorar la dureza de las películas. Las adhesiones de estos materiales a los sustratos de madera se midieron a través de la prueba de corte transversal (ISO 2409) [7].

Para las pruebas de color, Jiangsu Jun Instrument Technology Co., Ltd. tomó muestras que fueron colocadas en una cámara de acondicionamiento, se calibraron los sensores de temperatura con una precisión de 0.1 °C y se controló a intervalos de 200 s y se aumentó en un intervalo de 1°C. Los cambios de color están relacionados con el número creciente de cromóforos. Cuando las concentraciones de materiales termocrómicos aumentaron de 0 a 4%, el índice de claridad en las muestras tomadas disminuyó de -0.2 a -17.2 indicando

que el color de la superficie se vuelve más oscura; en cambio a un mayor valor aumentó notablemente de 0.6 a 36.2 indicando una sombra más profunda de color rojo siendo el color principal de la muestra el rojo [7].

En la figura 8 se muestra el proceso de cambio de color de una muestra con concentraciones de material termocrómico de

3 a 5%. A temperatura ambiente la madera resistente al calor mantiene su color natural, con un aumento de temperatura de 25°C a 40°C mostró un excelente proceso termocrómico y después de enfriarse a temperatura ambiente alrededor de los 25°C la madera vuelve a su color natural, lo que significa que tiene un buen comportamiento ortodrómico reversible [7].

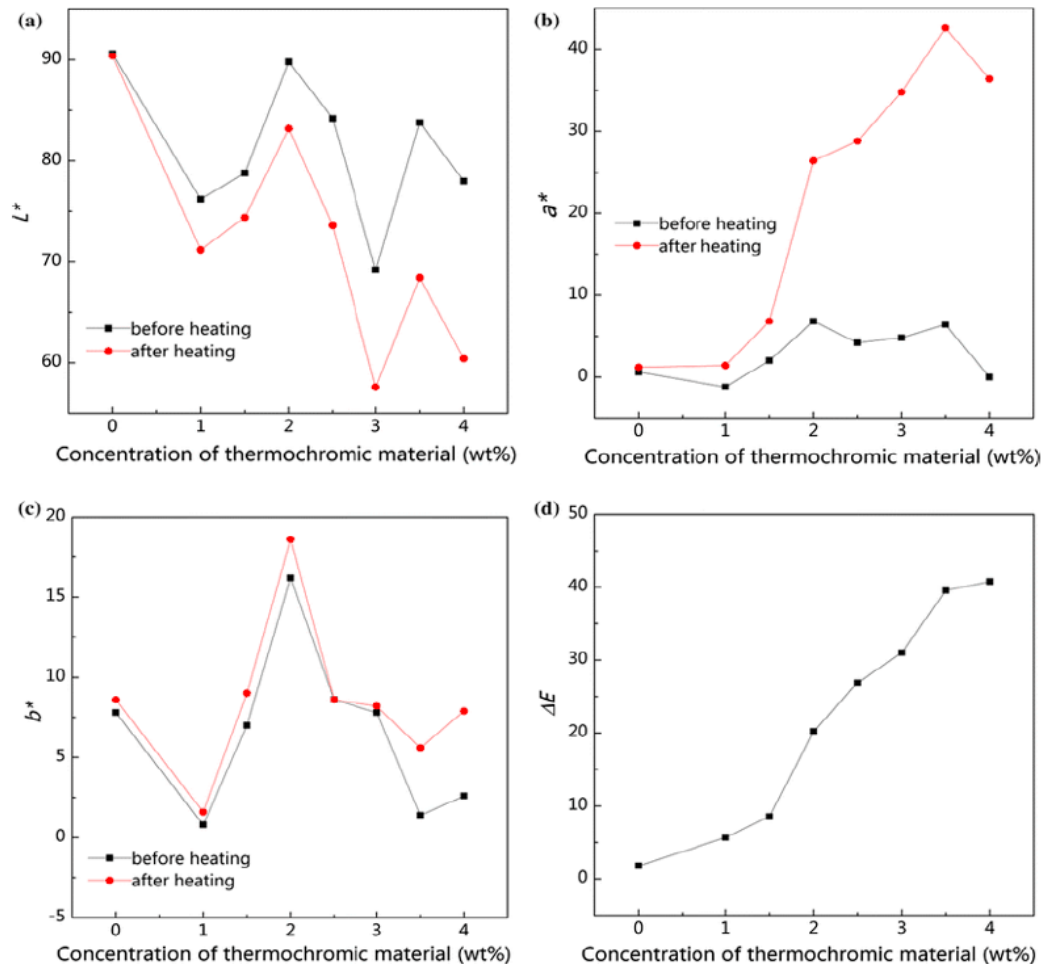


Fig. 9. Cambios en los parámetros de color de la superficie de muestra antes y después del calentamiento. . En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

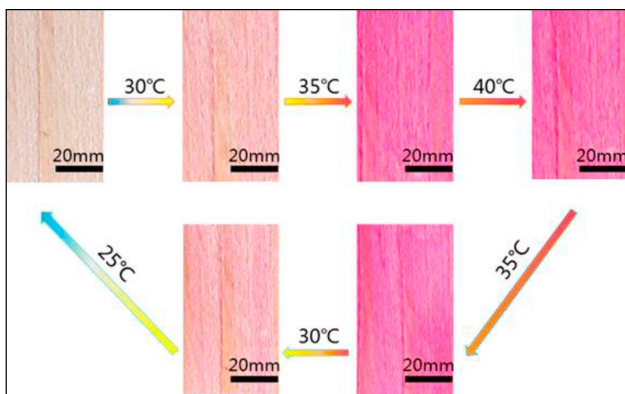


Fig. 10. Procesos de cambio de color de la madera termorresponsa. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

La madera termorresponsa podría aplicarse como indicadores de temperatura lo que podría aumentar el camino para las aplicaciones inteligentes de los materiales de la madera [7].

Entre otros resultados de investigaciones tenemos:

- ♦ Merk et al. desarrolló un material híbrido magnéticos de madera y nanocompuesto utilizando un enfoque de fabricación in situ
- ♦ Ly et al. desarrolló una madera conductora empleada como supercapacitador de estado sólido mecánicamente flexible empleando el método de inmersión y polimerización
- ♦ Hu et al. desarrolló materiales de madera

termocromáticos para el almacenamiento de energía mediante el recubrimiento de microcápsulas compuestas de una capa de melanina – formaldehído y un núcleo de cristal violeta lactona sobre la superficie de la madera

- ♦ La madera fotorresponsa como resultado de recubrir una superficie de madera con trióxido de tungsteno, convirtiéndolo en un nuevo tipo de material inteligente. Su color puede cambiar tras la irradiación con luz ultravioleta

3. CONCLUSIONES

Creemos haber aportado evidencias suficientes para demostrar que la madera es un biopolímero natural y renovable que contribuye a que sea empleado en una amplia gama de aplicaciones.

Con el auge de materiales sostenibles se han realizado múltiples investigaciones para encontrar nuevos materiales o descubrir nuevas propiedades en materiales existentes que aporten nuevas soluciones ingenieriles, como es en este caso la madera. La madera con memoria de forma tiene buen comportamiento y es de gran importancia en los edificios.

Los resultados permitieron conocer que la incorporación de la madera higroscópica cumple un papel importante dentro de los materiales y sistemas inteligentes de baja tecnología, además, debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de cambiar el volumen mientras está sujeto a estrés, es un buen candidato para transformar los sistemas de construcción.

La madera transparente permite reducir el consumo de electricidad en los edificios y posee una mayor resistencia a la tracción y dureza.

La madera termocromática podría aplicarse como indicadores de temperatura, el cual es beneficioso ya que amplía el camino para las aplicaciones inteligentes de la madera; aunque aún se continúa las líneas de investigación respecto a este material.

A pesar de que se han descubierto nuevas propiedades y se ha ampliado el uso de la madera convirtiéndose en un material de construcción inteligente aún se tienen que realizar investigaciones para reducir o eliminar aquellos factores que afectan la estructura de la madera y se puedan también emplear a grandes escalas.

4. REFERENCIAS

- [1] Rhee, P. (2018). Beyond Green: Environmental Building Technologies for Social and Economic Equity. *Architectural Design*, 88, 94-101.
- [2] Ugoley, BN. (2014). Wood as a natural Smart material. *Wood Science and Technology*, 3, 553-568.
- [3] Holstov.,Artem., Bridgens, Ben., Farmer, Graham. (2015). Hygromorphic

material for sustainable responsive architecture. *Construction and Building Materials*, 98, 570- 582.

- [4] Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars. (2018). Transparent wood for functional and structural applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A- Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 376, 2112.

- [5] Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li. (2017). Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance. *Journal of Materials Science*, 52, 7688-7697.

- [6] Fuentes Talavera, F.J, Silva Guzmán, J.A, Lomelí Ramírez, M.G, Ritcher, H.G, Sanjuán Dueñas, R. (2007). Comportamiento higroscópico de la madera de persea americana var. Guatemalensis mil (has). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8, 49 -56.

- [7] P, Bektha., P, Niemz.(2005). Effect of high temperatura on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce Wood. *Wood research and Technology*, 57, Issue 5.

- [8] Abdelmohsen, Sherif., Adriaenssens, Sigrid., El-Dabaa, Rana., Gabriele, Stefano., Olivieri, Luigui., Teresi, Luciano. (2019) *Computer – Aided Design*, 106, 43 – 53.

- [9] Sree, Haritha., Hickerson, Nathan., Saini, Shrikant., Tiwari, Ashutosh. (2017). Fabrication and characterization of transparent Wood for next generation smart Building applications. *Vacuum*, 146, 649 -654.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.