

LA MADERA COMO UN NUEVO MATERIAL SOSTENIBLE

Asdrúbal Valencia Giraldo^{1*}

1: Profesor Emérito, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

* E-mail: avalencg@gmail.com

RESUMEN

Ante la necesidad de materiales sostenibles la madera se ha encontrado que ofrece un sinnúmero de posibilidades, como material estructural y como material funcional. Esto se ha logrado con tratamientos térmicos, con la fabricación de compuestos, como los madera-polímero y con la aplicación de la nanotecnología. Los resultados han sido materiales con extraordinarias propiedades mecánicas y funcionales, que los hacen aptos para múltiples aplicaciones. El camino de la investigación y aplicación industrial apenas empieza y este artículo pretende hacer un llamado a nuestros ingenieros de materiales para que se ocupen de este amplio campo de posibilidades.

Palabras clave: Madera, tratamiento térmico de la madera, compuestos madera-polímero, materiales funcionales, nanotecnología, estructuras jerárquicas.

WOOD AS A NEW SUSTAINABLE MATERIAL

ABSTRACT

Given the need for sustainable materials, wood has been found to offer a multitude of possibilities, both as a structural material and as a functional material. This has been achieved with thermal treatments, with the manufacture of composites, like the wood-polymers, and with the application of nanotechnology. The results have been some materials with extraordinary mechanical and functional properties, which make them suitable for multiple applications. The path of research and industrial application is just beginning and this article aims to bring the attention of our materials engineers to deal with this wide range of possibilities.

Keywords: Wood, thermal treatment of wood, wood-polymer compounds, functional materials, nanotechnology, hierarchical structures.

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los recursos, la demanda energética y la contaminación ambiental, que significa la producción de materiales y la disposición de los desechos, han hecho que la escogencia de los materiales de construcción, que exhiban atributos ambientales positivos, se haya vuelto una tarea urgente para los ingenieros, sobre todo para los de materiales. Ellos deben enfocar su trabajo pensando en el ciclo total de vida del producto, es decir, desde la obtención de la materia prima, pasando por el proceso de fabricación, hasta el final de la vida de este. Varios productos fabricados conforme a esos principios van hoy acompañados de una nueva marca de certificación, a saber, *Cradle to Cradle*TM (C2C), con la que se quiere denotar esa preocupación por lo que pasa con un producto desde que es creado y hasta el final de su vida. Para ese fin cobran cada vez más importancia los biomateriales.

Es de anotar que la filosofía tras el principio *De la cuna a la cuna. Rediseñando la forma en que se hacen las cosas*, se basa en que reducir el impacto sobre el medioambiente provocaría un ritmo más lento del mismo, pero tarde o temprano se estaría llegando a un mismo final. Por ello se propone que se minimicen los problemas desde su raíz: en lugar de simplemente reducir los consumos de energía, se debe controlar desde el propio diseño y concepción de cualquier producto, estrategia o política y tener en cuenta todas las fases de los productos involucrados (extracción, procesamiento, utilización, reutilización, reciclaje...).

Aquí debe tenerse en cuenta el concepto de *energía incorporada*, que se refiere a la cantidad de esta requerida para cosechar, extraer de la mina, manufacturar y transportar hasta el punto de uso el material o producto.

Se ha demostrado que la energía requerida para lograr productos de madera es mucho menor que la necesaria con otros materiales. Si la madera los sustituye (suponiendo que una duración similar permite una sustitución igual), se ahorra energía y se evitan emisiones cada vez que se usa madera, lo que le da una gran ventaja ambiental [1].

Por estas y otras razones, el uso de los productos de madera como materiales de construcción ha adquirido gran importancia y el propósito de este artículo es recordar a los ingenieros lo mucho que se está haciendo para mejorar las propiedades de estos materiales. Básicamente se considerarán dos aspectos, los tratamientos –sobre todo los térmicos– y los compuestos.

En general, la gente piensa que la madera es un material limitado porque se quiebra, se quema y se pudre. Sin embargo, se debe recordar que este material tiene una resistencia a la ruptura que es una de las mayores, si se tiene en cuenta que su densidad está entre las menores, en este sentido está al nivel de materiales como el kevlar o los compuestos fibrosos. De naturaleza biológica, es un arreglo de células que tienen elevada porosidad –el roble, por ejemplo, contiene 50% de aire– en tanto que las fibras de celulosa de las paredes le dan su rigidez. Es decir, la madera es sólida y liviana, lo que la hace un material particularmente adecuado para muchas aplicaciones. Es por ello que, en la actualidad, se piensa que la madera es uno de los materiales del futuro [2,3].

Esto se va haciendo cada vez más cierto pues, investigadores de la Universidad de Maryland presentaron, en 2018, una nueva manera de tratar la madera que la hace 12 veces más resistente mecánicamente que la versión natural, y diez veces más tenaz, una combinación que no es muy común. El tratamiento hace la madera tan resistente como el acero, pero seis veces más liviana [4].

Resultados similares se han logrado con nanotecnología, pues de igual manera se desarrollan procesos para modificar la madera, para hacer compuestos y para lograr múltiples aplicaciones, como es el caso de los materiales biomédicos, todo lo cual hace que este sea uno de los nuevos materiales promisorios [5,6].

2. LA MADERA

El tronco, Figura 1, consiste en la corteza, que es la capa más exterior, que protege a la planta de las agresiones externas. La corteza está compuesta de células muertas. El liber, una película o tejido muy delgado que transporta los nutrientes elaborados mediante la fotosíntesis, es decir transporta la savia. El cámbium es el tejido que se encuentra entre la corteza y la madera. Constituye la base del crecimiento del árbol. Cada año el cámbium origina dos capas de células adultas. La primera, hacia el interior, células leñosas que forman la albura del leño (xilema); estas son las que forman la madera y se reconocen luego como anillos de crecimiento. Los anillos de crecimiento son capas

concéntricas alrededor del árbol. Contándolos se puede saber la edad del árbol en el momento en que se cortó el tronco o murió. Normalmente cada anillo suele ser un año. La albura es la parte joven de la madera, corresponde a los últimos anillos de crecimientos del árbol, producidos por el cambium vascular en el tallo de una planta. La albura suele ser de un color más claro. El duramen es tejido duro y muerto presente en algunas especies. Es la madera de mejor calidad. Es donde se empieza a crear la madera. En el centro está la médula, núcleo o corazón.

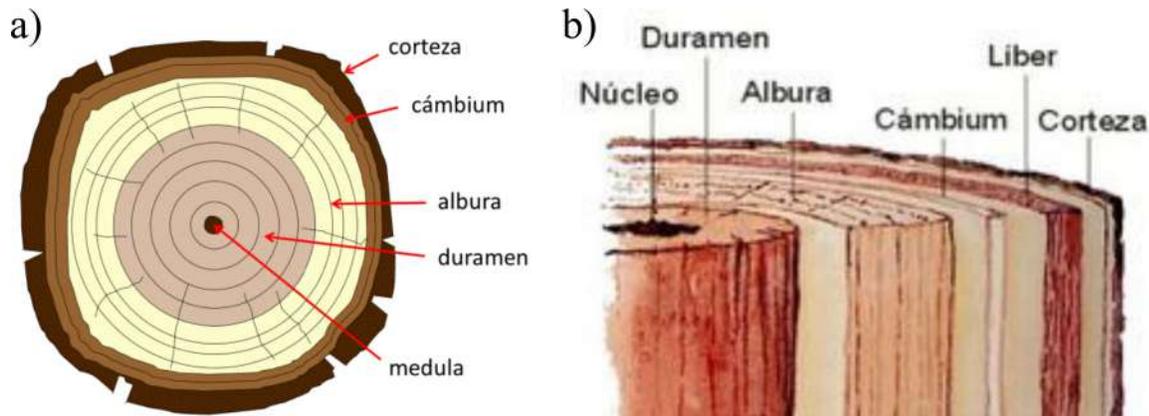


Figura 1. Partes del tronco. a) Vista superior [7] y b) Vista lateral [8].

La madera consiste en un xilema lignificado –xilema o albura es el tejido vegetal formado por células muertas, rígidas que conducen la savia y sostienen la planta y la lignina es una sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia– que está compuesto de células largas y delgadas generalmente orientadas con su extensión longitudinal en dirección del tallo. Hay varios tipos de células en el xilema para atender las diferentes necesidades del árbol vivo, como resistencia mecánica, transporte y almacenamiento. El tipo y características de esas células difieren no sólo entre las maderas duras y las blandas, sino también entre las partes duramen o albura, y las especies, madera temprana. En los países con estaciones la madera temprana –o de primavera– es la parte del anillo de crecimiento formada al principio del período vegetativo, que, a menudo, da lugar a madera menos densa, más clara y con células de mayor diámetro y menor espesor de pared que la madera tardía –. La madera tardía –o de verano– es la parte del anillo de crecimiento formada al final del período vegetativo, a menudo más densa y oscura y con células de menor diámetro y mayor espesor de pared que la madera de primavera.

La madera dura –en los climas con estaciones– es la de los árboles de hojas grandes (que las pierden en cada otoño, conocidos como angiospermas porque sus semillas están en frutas o vainas). Ejemplos son fresno, abedul, caoba, arce, roble, teca y nogal, pero hay unas 35 000 especies de estos árboles. En esas regiones la madera blanda proviene típicamente de los árboles siempre verdes (las coníferas) también llamados gimnospermas (semillas desnudas). Ejemplos son cedro, ciprés, abeto, pino y secuoya y hay unas 1000 especies de este tipo de madera.

En las maderas blandas se pueden encontrar dos tipos diferentes de células: traqueidas y parénquima. Aproximadamente 90 – 95% de las fibras en las maderas blandas son traqueidas, las cuales proporcionan capacidades de resistencia y transporte al árbol. Las traqueidas en el pino silvestre y el abeto de Noruega son de 1 a 5 mm y el ancho y 10 a 40 μm , según sea madera

temprana o tardía. Las traqueidas están interconectadas tangencialmente y longitudinalmente y maneja el transporte en dirección radial.

En cuanto a la composición química, se debe empezar por recordar que el contenido de agua de la madera viva varía de acuerdo con la especie, la estación y la hora del día, pero es de 40 a 50%. La madera seca está compuesta principalmente de polisacáridos. Por ejemplo, en el abedul la masa seca está compuesta por 40% de celulosa y 30 – 35% de hemicelulosa. La proporción de lignina es 20 a 25%. La madera blanda tiene más lignina y las cantidades de hemicelulosa y lignina son más o menos iguales. En resumen, la madera dura de las zonas templadas está compuesta por 95% de sustancias macromoleculares el 5% restante son principalmente materiales extractivos, proteínas y sustancias inorgánicas con sílice como la sustancia inorgánica más abundante.

La celulosa, el principal componente del xilema, consiste en varias unidades de D- glucosa vinculadas entre sí. La fórmula química de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde n puede variar desde varios cientos hasta más de diez mil.

En tanto que la celulosa está compuesta solamente de glucosa, la hemicelulosa se deriva de varios tipos de azúcares fuera de la glucosa. La estructura de la hemicelulosa, aleatoria, ramificada y amorfa está compuesta de cadenas de aproximadamente 200 unidades de monosacáridos. La hemicelulosa es estructuralmente más débil que la celulosa y más susceptible a la hidrólisis. El tercer componente principal del xilema es la lignina, una macromolécula aromática hidrofóbica con peso molecular superior a 10.000 daltons.

Visto este resumen de lo que es la madera es necesario recordar que las propiedades se cambian mediante la llamada modificación. Pero ¿qué es la modificación de la madera? Una definición general fue dada por Hill en 2006: “Las modificaciones de la madera incluyen la acción de un agente químico, biológico o físico sobre el material, dando como resultado una mejora deseada de una propiedad durante la vida en servicio de la madera. Esta parte de la definición se acepta en general. La segunda parte de su definición, “La madera modificada no debe ser tóxica en las condiciones de servicio y al final de su vida...” debe considerarse una recomendación importante para un producto nuevo, pero no como un prerrequisito para la modificación de la madera como tal, porque algunas tecnologías de modificación de la madera no se han probado lo suficiente. El cambio de la madera con productos químicos y procesos peligrosos también es modificación de la madera; sin embargo, tales productos no tendrían aceptación [9,10].

Es necesario puntualizar que el desempeño de la madera depende de un amplio espectro de características, la importancia de las cuales depende del uso que se pretenda darle. Entre esas características están: La resistencia mecánica, la rigidez, la dureza, la retención del acabado, la tratabilidad con preservantes, la resistencia a la contracción, a la hinchazón, al pandeo, al sellado, al deterioro en la intemperie, a la foto degradación y a los cambios de color. Es decir, el comportamiento frente al sol, la humedad y los ciclos de calor, los cambios en los contenidos de humedad, los insectos y los hongos [11].

En todo caso, este trabajo está centrado en el tratamiento térmico y en la formación de madera reforzada o modificada.

2. TRATAMIENTO TÉRMICO

Para evitar las posibles consecuencias adversas que puedan tener los tratamientos químicos en la madera, una alternativa, cada vez más usada, es el tratamiento térmico, que mejora las propiedades

sin adición de productos químicos contaminantes. Cuando la madera se calienta empiezan a ocurrir cambios químicos en su estructura. Esos cambios dan como resultado un aumento en la durabilidad y en la estabilidad dimensional.

La modificación térmica de la madera hace ya mucho tiempo que se sabe que es un método potencial para mejorar la estabilización dimensional de la madera y aumentar su resistencia al decaimiento. Tiemann, en 1915, fue uno de los primeros que reportó el efecto de la temperatura elevada sobre las propiedades físicas de la madera. Él calentó madera seca en vapor sobrecalentado a 150 °C durante 4 horas, lo que redujo la posterior absorción de humedad en 10 a 15%, con una reducción relativamente baja de la resistencia, en la mayoría de los casos [12].

En 1936 Kollmann usó temperaturas elevadas y densificación con un proceso llamado *Lignostone* [13]. De acuerdo con Morsig un producto similar de laminado de madera comprimida se comercializó en Alemania bajo el nombre de *Lignifol* [14]. Stamm y Hansen, en 1937, mencionan un reporte no publicado del Laboratorio de Productos Forestales, de 1916, que incluía un estudio del calentamiento de madera de goma negra a 205 °C, que dio como resultado una disminución en la higroscopicidad [15].

En Estados Unidos Seborg et al., 1945, crearon un laminado, como los ya mencionados, al que llamaron *Staypack* [16]. En ese tiempo ninguno de esos procesos fue exitoso. Pero los tratamientos térmicos no se olvidaron y algunos estudios fueron presentados más tarde por Seborg et al (1953), Kollmann y Schneider (1963), Kollmann y Fengel (1965), Noack (1969), Fengel (1966), D'Jakonov y Koneplava (1967), Nikolov y Encev (1967), Burmester (1973, 1975), Rusche (1973) Giebeler (1983) y Hillis (1984) [17–30].

En el siglo XXI los estudios han llevado al desarrollo de distintos métodos comerciales de tratamiento térmico de la madera, en muchos países. Estos se llevan a cabo a temperaturas entre 180 °C y 260 °C, pues con temperaturas inferiores a 140 °C sólo se logran pequeños cambios en las propiedades del material y las más elevadas dan una degradación inaceptable del sustrato, por ello los estudios de tratamientos a temperaturas superiores a 300 °C son limitados, debido a la degradación de la madera. También hay evidencia que muestra que hay un cambio abrupto en la cinética de degradación a estas temperaturas [31]. Es por ello que las modificaciones térmicas actuales se hacen a menos de 280 °C y más comúnmente a menos de 260 °C.

El tratamiento térmico contribuye a la degradación térmica de los componentes de la madera y cambia la cristalinidad de la celulosa y este cambio influye sobre la elasticidad, las capacidades de absorción y otras propiedades físicas de la fibra, industrialmente valiosas. Pero los cambios son diferentes si se hacen en estufa seca o en condiciones de alta humedad, en el último caso el cambio en la cristalinidad ocurre más fácilmente [32].

Entre los tratamientos térmicos comerciales están el proceso finlandés (Thermowood) que usa vapor [33], el holandés (Plato Wood) que utiliza una combinación de vapor y aire caliente [34], el francés (Rectification) con gas inerte [35], y el alemán (OHT) con aceite caliente [36].

A continuación se hará un resumen de la manera cómo cambian las propiedades mediante el tratamiento térmico de la madera.

Entre las grandes ventajas de la madera tratada térmicamente se destacan la notable resistencia al ataque de los hongos, sin la necesidad de usar preservantes, con la consiguiente ventaja ambiental; la mejora en la repelencia del agua y la superior estabilidad dimensional en la relación con las variaciones de la humedad [37].

Es por ello que el conocimiento de la energía libre superficial de la madera trata térmicamente es importante para optimizar los diferentes recubrimientos y los procesos de pegado [38].

Y se ha encontrado que la energía libre superficial de la madera, que es la suma de los componentes de van der Waals y ácido-base, disminuye un poco tras el tratamiento térmico [39].

En el caso de la haya, tratada entre 130 y 160 °C en una estufa con nitrógeno, se muestra que no se necesitan temperaturas elevadas para mejorar las características hidrofílicas y este cambio en la mojabilidad tiene consecuencias significativas en el uso del material, sobre todo en la adhesión de pinturas y recubrimientos [40].

Además, el tratamiento térmico aumenta la durabilidad de la haya contra los hongos, y esta resistencia depende de la temperatura de tratamiento, de modo que es total a 280 °C. La correlación que se ha observado entre la temperatura de tratamiento y la durabilidad indica que la modificación química y la degradación, que parece por encima de 200 °C, es la hipótesis más plausible para explicar la mejora de la durabilidad de la madera [41].

Algunos de los señalados cambios se han interpretado en términos de la modificación de la lignina, pero algunos investigadores dicen es importante la formación de productos carbonáceos, incluso a temperaturas por debajo del tratamiento térmico [42].

Pero es fundamental señalar que la madera tratada térmicamente mejora la resistencia al decaimiento y la estabilidad dimensional, pero la resistencia mecánica disminuye. Por ejemplo, todavía en 2008 se anotaba que, en el tratamiento del pino marítimo, no hubo mejora en las propiedades mecánicas, al contrario, disminuyeron [43].

Sea cual sea el tratamiento térmico, seco o no, hay un compromiso entre la durabilidad y las propiedades mecánicas, a mayor temperatura, mejor la durabilidad y menores propiedades mecánicas, como la resistencia. Experimentos en Francia mostraron que la madera tratada a 230 – 240 °C es mucho más durable, pero puede perder hasta 40% en el módulo de rotura (MOR) y es más frágil [44].

Sin embargo, algunos investigadores afirman que todo esto depende grandemente del tratamiento y del tipo de madera, por ejemplo, un investigador portugués señala lo siguiente después de tratar madera de eucalipto: “Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos, se puede decir que las propiedades mecánicas se ven ligeramente afectadas. El módulo aparente de elasticidad fue un poco mayor en la madera tratada, a pesar de una reducción del 29% en la resistencia transversal. Otra conclusión es que no encontramos ninguna diferencia en la resistencia a la flexión entre muestras ensayadas con la orientación plana del grano o de canto.

Si el tratamiento térmico de esta especie es una solución contra la vulnerabilidad a la humedad, consecuente con los altos valores de contracción e hinchamiento, las propiedades mecánicas no deben ser un obstáculo para usar esta madera en aplicaciones estructurales” [45].

De la misma manera, investigadores canadienses dicen que, tras estudiar las propiedades mecánicas de cinco especies que crecen en Quebec, tratadas por el proceso ThermoWood, su comportamiento es aceptable, que generalmente, la reducción en el módulo de elasticidad es menor que en el módulo de ruptura; que en la madera dura, como álamo temblón y abedul el módulo de elasticidad aumentó 15% y 30%. Pero es básico señalar la importancia del espesor de la muestra, el contenido inicial de humedad de la madera, la máxima temperatura de tratamiento y el tiempo total de tratamiento [46].

En fin, investigadores turcos que trabajaron con pino silvestre –nativo de Eurasia también conocido como pino de Valsain, pino serrano, pino albar, pino del Norte, pino rojo o pino bermejo–, concluyen que la resistencia a la compresión paralela al grano, la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión, la dureza, la resistencia a la flexión por impacto y la resistencia a la tracción perpendicular al grano decrecen con el tratamiento térmico. Más aun, los resultados mostraron que al aumentar el tiempo era mayor el decrecimiento y la menor disminución ocurrió en el tratamiento a 120 °C durante 2 horas. Sin embargo, anotan que las pérdidas en resistencia se pueden limitar con técnicas avanzadas de tratamiento térmico. Mediante tratamiento térmico se pueden mejorar las propiedades de varias especies de árboles sin pérdidas cuando la estabilidad es importante. Esto permite usar maderas sin valor comercial [47].

Sin pretender entrar a detallar todos los estudios que se han hecho al respecto en este siglo, debe destacarse el procedimiento desarrollado en la Universidad de Maryland y reportado en 2018, que implica algunos pasos más que el simple tratamiento térmico, pero que da unos resultados impresionantes. El tratamiento consiste en la remoción parcial de la lignina y la hemicelulosa hirviendo la madera en una mezcla acuosa de NaOH y Na₂SO₃, lo cual es seguido de un prensado en caliente, a 100 °C, (con una reducción de casi 80% en el espesor), lo que lleva al colapso total de las paredes de las células y la completa densificación con nano fibras de celulosa altamente alineadas. Y esto es aplicable a muchas especies de madera.

Las propiedades mecánicas de esta madera densificada no solo son notablemente superiores a las de la madera natural, sino que sobrepasan a las de muchos materiales estructurales muy usados (por ejemplo plásticos, acero y aleaciones). Al comparar las curvas tensión- deformación para las maderas natural y densificada, la segunda mostró una resistencia a la tracción de 587 MPa, que es 11.5 veces mayor que la madera natural no tratada y también mucho más elevada que la de los plásticos típicos (como nylon 6, policarbonato, poliestireno y epóxicos) [48].

Todo esto muestra las enormes posibilidades que tiene la madera como material de ingeniería y lo que puede lograrse con tratamientos adecuados, para hacerla un verdadero nuevo material.

3. MATERIALES CON COMPUESTOS CON BASE MADERA

Otra ruta para obtener nuevos materiales a partir de la madera son los compuestos que, en general, incluyen un amplio espectro de productos que tienen alguna combinación de elementos de madera unidos por un aglutinante adhesivo. Normalmente contienen el mismo tipo de madera usada en construcción, pero están combinados para hacerlos más resistentes y más durables, por eso se conocen como madera diseñada o compuestos madera - plástico. Es un campo que está en expansión por la creciente demanda de los compuestos existentes y una solicitud en aumento de otros productos para nuevas aplicaciones.

La primera generación de compuestos de madera fue una combinación de aserrín o astillas de madera y aglutinantes. Eran ideales para aplicaciones no muy exigentes. La nueva, y en rápido desarrollo, generación de compuestos de madera y plástico, tiene buenas propiedades mecánicas, elevada estabilidad dimensional y se puede usar para producir formas complejas. Son tenaces y se pueden extrudir a tolerancias dimensionales muy altas. Los nuevos materiales plástico - madera son productos de alta tecnología para las aplicaciones más exigentes.

El procedimiento para hacer un compuesto de madera empieza con la preparación de esta, la limpieza, el corte y el secado. Se pueden obtener muchos tipos de productos usando los mismos elementos de madera, eso dependerá del tipo de adhesivo el procesamiento, compresión,

impregnación, extrusión, etc. De manera amplia los compuestos, inicialmente, se pueden agrupar de acuerdo con el aglutinante, que puede ser un plástico termoestable o bien cemento o un termoplástico. Pero acá se presentarán, además, otras alternativas.

3.1. Compuestos con plásticos termoestables

Los compuestos de madera se fabrican con materiales que tienen diversas geometrías (fibras, partículas, hebras, escamas, chapas y maderos) combinados con una resina termoplástica y unidos en una prensa. La prensa aplica calor, si se necesita, y presión para activar (entrecruzar) la resina adhesiva y unir la madera en una plancha sólida, un madero o una viga con buenas propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) y físicas (forma, estabilidad, dimensional, etc.).

Los elementos de madera usada se dividen, ampliamente, en dos categorías, “grano largo” y “grano corto”. El elemento más grande, excepto los maderos mismos, es la chapa. Los cortos incluyen las hebras, escamas, obleas, partículas y fibras. También se usa el reciclaje, como el aserrín y la harina de madera, que se pueden considerar como un tipo de madera aparte.

Los adhesivos termoestables usados para formar compuestos no son demasiados, como las amino resinas, es decir, urea – formaldehído y melanina – formaldehído y también resinas fenólicas como fenol – formaldehído y resorcinol – formaldehído. En menor medida se usan compuestos de vinilo, polivinilos y otros.

Las mejoras en los compuestos de madera se pueden lograr en tres áreas: (1) mejoras en las propiedades de la madera, (2) mejoras en las propiedades adhesivas, y (3) mejora total en el diseño del compuesto de madera. La mayoría de los avances en las dos últimas décadas se han obtenido mejorando el equipo de fabricación y el diseño del compuesto (plancha orientada, vigueta en I, madera de hebra paralela, laminado de madera de hebra), pero los avances actuales y futuros parece que se basarán cambios en las propiedades de la madera (como la modificación genética). Sin embargo, dada la importancia de tener alternativas para los materiales derivados del petróleo, el desarrollo de nuevos adhesivos, como los basados en la soya, serán fundamentales en los nuevos compuestos de madera [49].

3.2. Compuestos con plásticos termoplásticos

Mientras los compuestos de madera con plásticos termo estables datan de principios del siglo XX, los compuestos con termoplásticos aparecieron en el decenio de 1980, donde se usan, además, rellenos inorgánicos como carbonato de calcio, fibra de vidrio y otros como arcilla, talco o mica. En menor medida se usan fibras naturales. Los materiales inorgánicos mejoran algunas propiedades del compuesto (por ejemplo, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad) y se usan como rellenos, pero tienen sus problemas porque provienen de fuentes no renovables y son más pesados, por eso se buscan fibras naturales para ese propósito y los materiales lignocelulósicos han avanzado mucho en los últimos años [50–55].

Otro camino es usar un componente de madera modificada en el compuesto, por ejemplo, la modificación de la madera por acetilización es una reacción de un paso donde un grupo acetil reemplaza un grupo hidroxil en la pared de la celda del polímero. En el proceso de modificación, el material de la madera se impregna con anhídrido acético a temperatura elevada [56]. El único producto secundario es ácido acético. La madera modificada exhibe mayor estabilidad dimensional, la misma Resistencia mecánica, menor contenido de humedad en equilibrio y resistencia superior a la degradación biológica. La incorporación de un componente de madera

modificada en el compuesto madera-plástico permite un mayor contenido de madera sin comprometer la durabilidad a largo plazo, porque decrece los movimientos de la humedad en el material y reduce la formación de grietas por esta causa [57].

3.3. Procesos nanotecnológicos

La nanotecnología también se está usando para modificar la madera y utilizarla como material funcional. Recuérdese que los materiales funcionales se caracterizan generalmente como los que poseen propiedades particulares y funcionan por sí mismos. Por ejemplo funciones como ferroelectricidad, piezoelectricidad, magnetismo o almacenamiento de energía. Los materiales funcionales pueden ser de cualquier clase: cerámicos, metales, polímeros y moléculas orgánicas.

La madera se puede usar, por ejemplo, como andamio en la ingeniería de tejidos. El objetivo de la ingeniería de tejidos es reparar tejidos reproduciendo los mecanismos que intervienen en la renovación de las células del organismo. Es una alternativa al trasplante tradicional de órganos que no siempre es posible tanto por la falta de donantes como por el riesgo de que el paciente rechace el órgano recibido.

La ingeniería de tejidos se basa en el uso, de forma conjunta o separada, de tres elementos:

- i. **Células** cultivadas y/o modificadas genéticamente en el laboratorio.
- ii. **Moléculas** que actúan como señales químicas sobre esas células haciendo que, por ejemplo, comiencen a multiplicarse.
- iii. **Estructuras tridimensionales** que pueden imitar la estructura de un órgano. Sirven para reemplazar parte de un órgano dañado que ha dejado de desarrollar su función o como vehículo para transportar células y moléculas en su interior hasta el tejido u órgano.

Esta ingeniería es una especialidad que aplica los principios de la Ingeniería y las ciencias de la vida a la fabricación de sustitutos biológicos que mantengan, mejoren o restauren la función de órganos y tejidos en el cuerpo humano [58].

En este campo es promisoría la madera porque es un andamio biológico, renovable y robusto con estructura jerárquica y tiene una gran superficie interior ($300 \text{ m}^2/\text{g}$ para las paredes de células hinchadas) [59]. lo que lo hace muy adecuada para procesos nanotecnológicos como plantilla o funcionalización de las superficies exteriores o interiores [60].

Por consiguiente, el objetivo es mejorar y avanzar las estructuras jerárquicas naturales añadiendo nuevas funcionalidades a su desempeño estructural. En años recientes, la investigación de la nanotecnología en la madera hacia nuevos conceptos del material se ha convertido en un amplio campo de investigación. La expresión “nanotecnología de la madera” tal vez se asocia primariamente con la investigación en la extracción y uso de la nanocelulosa o lignina para nuevos materiales [61–66]. Sin embargo, también incluye tecnologías aplicadas a la madera masiva.

De otro lado, se sabe que la madera se forma hacia adentro desde el cambium y la corteza hacia afuera. La mayor parte de las células de la madera (hasta 95%) mueren al final del proceso de diferenciación y síntesis, y en la madera del corazón, en el centro del tronco de muchos árboles no hay células vivas [67–70]. Por tanto, en el tronco masivo del árbol vivo solo una pequeña fracción de las células tienen un metabolismo activo, el resto está muertas y son una estructura pasiva. Esta situación es altamente eficiente en energía y económica para el organismo del árbol como tal.

Una característica importante de la madera, que se puede utilizar para los tratamientos de funcionalización, es su sofisticada estructura jerárquica. Se pueden definir diferentes niveles

empezando por el arreglo nanoescalar de las biomacromoléculas de las paredes de la célula [71,72]. El nivel más alto siguiente está caracterizado por la organización de la pared de la célula en términos de las capas con diferentes composiciones químicas y estructuras. En la microescala los tipos individuales de células con diferentes tamaños, formas y funciones, como fibras, traqueidas o vasos, forman los tejidos de la madera. En la macroescala, la organización de esos tejidos constituye el cuerpo sólido de la madera.

Utilizar las características específicas de esta estructura evolucionaria y haciendo uso de la diversidad anatómica de las diferentes especies de madera para determinados tratamientos nanotecnológicos en un enfoque de arriba abajo da como resultado materiales con base biológica y bioinspirados. Conceptualmente esos materiales son muy diferentes de los basados en los tratamientos clásicos de modificación de la madera o los bioinspirados producidos en un proceso de abajo hacia arriba.

Usando la estructura jerárquica de la madera, Figura 2, como un andamio que se somete a diferentes esquemas de funcionalización, se pueden evitar los esfuerzos de investigación y desarrollo en los procesos de ensamble y tener nuevos tipos de materiales funcionales de madera.

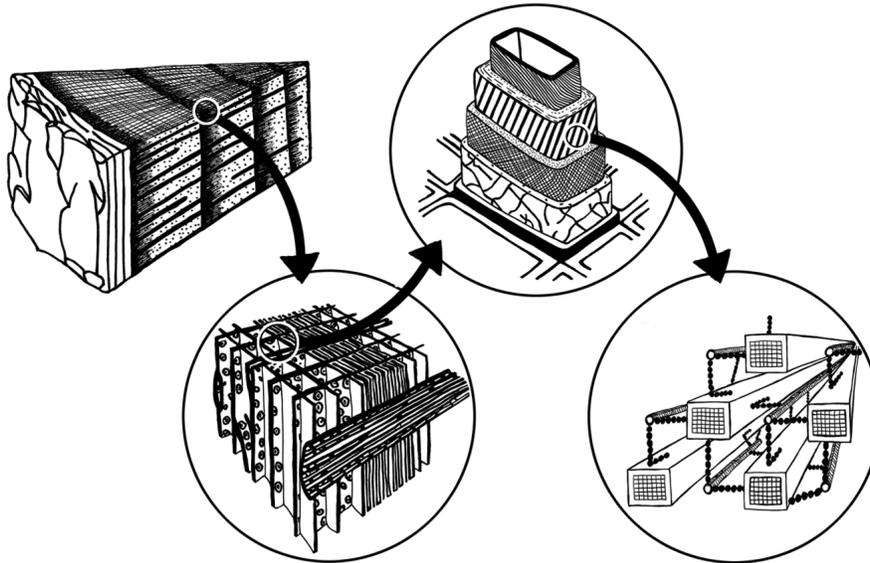


Figura 2. Ilustración de la estructura jerárquica de la madera desde las paredes de la célula en la nanoescala, las células que forman tejidos en las microescala y la madera en la escala macroscópica [72].

El proceso empieza por la caracterización, que permite lograr el control nanoestructural de la distribución de los polímeros al funcionalizar la madera. El control nanoestructural implica que se controla la ubicación y distribución de las fases poliméricas de la madera. Esto es importante para los compuestos madera – polímero avanzados para almacenar energía (conductividad eléctrica), purificación del agua o sistemas que responden, donde las propiedades del material se alteran debido a cambios en el pH, la temperatura, la humedad relativa, la luz o la aplicación de campos externos (magnético, eléctrico, etc.).

En estas líneas hay que decir que los híbridos orgánico-inorgánicos de madera pueden ofrecer nuevas posibilidades científicas y en términos de potencial industrial. Un objetivo importante es,

por tanto, controlar la distribución nanoescalar de materia inorgánica en el tejido de la madera y entender los mecanismos de las nanopartículas sobre las propiedades de la madera. Se han estudiado híbridos con óxido de hierro, sulfato de bario, alúmina y carbonato de calcio, por ejemplo [73–75].

Para el propósito anterior se han usado los silanos y otros híbridos orgánico-inorgánicos que a menudo se basan en andamios nanoestructurados y porosos funcionalizados por moléculas orgánicas. Esas moléculas se pegan a las superficies internas del andamio poroso.

De otro lado, la investigación reciente ha atraído la atención sobre los compuestos de madera modificados para que se hagan transparentes (madera transparente). Este es un ejemplo donde la nanotecnología puede dar como resultado conceptos inesperados del material, basados en la selección de los componentes de este y el diseño de su estructura. La madera transparente fue preparada por primera vez en 1992 para estudios morfológicos [76]. Li y sus colaboradores entonces discutieron las posibilidades en aplicaciones ingenieriles y reportaron las propiedades físicas [77]. Después de esto, muchos estudios han considerado aplicaciones, sobre todo para edificios, celdas solares y fotónica [78–84]. En 2016 Li y sus colaboradores señalaron que la madera transparente también tiene la ventaja de una baja conductividad térmica [85].

4. LA MADERA COMO BIOMATERIAL

Además de los mencionados andamios para la ingeniería de tejidos, la madera promete ser un buen biomaterial para llenar la demanda de sustitutos del hueso requeridos por el siempre en expansión conjunto de procedimientos y técnicas quirúrgicas. La madera, como un compuesto fibroso natural, modificado por tratamiento térmico es una nueva aproximación al desarrollo de biomateriales estructurados jerárquicamente.

En una investigación de 2015 se estudió la idoneidad de la madera como un biomaterial modelo, así como los efectos del tratamiento térmico, colocando implantes de abedul sin tratar y tratados (a 220, 200 y 140 °C durante 2 horas) en las cavidades perforadas en el fémur distal de conejos [86]. El período de seguimiento fue de 4, 8 y 20 semanas en todos los experimentos *in vivo*. Se determinaron las propiedades flexionales así como los cambios dimensionales y la formación de hidroxiapatita en la superficie de la madera (sin tratar y tratada a 140° y 200 °C), para lo que se usaron ensayos de flexión en tres puntos y compresión e inmersión en fluido corporal simulado. El efecto del pulido previo y el tratamiento térmico sobre la rugosidad superficial y el contorno de la madera se ensayaron con puntas de contacto y perfilometría sin contacto. El efecto del tratamiento térmico de la madera en las interacciones con los fluidos biológicos se estimó usando dos medios diferentes de ensayo y sangre humana real en ensayos de penetración de líquidos.

Los resultados mostraron las grandes posibilidades de la madera tratada y su aplicabilidad como biomaterial. Algo que fue confirmado en por otros investigadores en 2016 [87–89].

Yendo más allá, es decir, sabiendo que la naturaleza provee una reserva inagotable de mecanismos de transferencia y principios para el desarrollo de materiales avanzados bioinspirados, se combina esta ventaja con la ciencia de la madera, usando herramientas metodológicas de la nanotecnología y la química de los polímeros y se pueden diseñar materiales avanzados de madera para aplicaciones como biomaterial.

Es más, si se consolida el trabajo conjunto de la nanotecnología y la biotecnología, los árboles pueden producir directamente madera que es más adecuada para funcionalización, por ejemplo,

reduciendo el contenido de lignina u otras modificaciones que abran la micro y la nanoestructura del andamio de la pared de la célula.

Por lo pronto se ha logrado esa transferencia de lo nano a lo macro en el caso de la celulosa. Es sabido que a escala nanoscópica los bloques constitutivos de muchos materiales exhiben extraordinarias propiedades mecánicas debido a su estructura molecular libre de defectos. El traslado de esas propiedades a los materiales macro es un desafío para la ingeniería de materiales debido a la necesidad de organizar esos bloques en modelos multiescala y mitigar los defectos que surgen a escalas mayores. Como se sabe, las nanofibrillas de la celulosa, el más abundante elemento estructural de los elementos en sistemas vivos, tienen una resistencia y una rigidez impresionantes, pero la de los compuestos naturales o artificiales de celulosa so de 3 a 15 veces más débil. Pero, en 2018, los investigadores del Real Instituto de Tecnología o Kungliga Tekniska Högskolan de Estocolmo, reportaron que el flujo asistido en la organización de las nanofibrillas de la celulosa en fibras macro produjo alineamientos unidireccionales casi perfectos. La transferencia eficiente de la tensión a la macro escala desde las nanofibrillas de la celulosa individuales, debido al entrecruzamiento y el alto grado de orden, permitió que su módulo de Young fuera de 86 GPa y la resistencia a la tracción de 1.57 GPa, lo cual excede las propiedades mecánicas de los materiales biopoliméricos naturales o sintéticos. La resistencia específica de las nanofibrillas de la celulosa fabricadas en multiescala también excede la de las fibras de metales, aleaciones y vidrio, lo que potencia el desempeño de materiales livianos y sostenibles de alto desempeño [90].

5. CONCLUSIÓN

Se espera que este apretado resumen haya mostrado los grandes avances que han ocurrido recientemente en el tratamiento de la madera, sola, o como compuesto, para generar nuevos materiales con enormes posibilidades. Un tema que debería llamar la atención de nuestros ingenieros de materiales, dadas las posibilidades de un desarrollo sostenible.

6. REFERENCIAS

- [1] Clancy, Gunila, *Guiding the development of wood-based materials towards more sustainable products*, Thesis for the degree of Licentiate in Philosophy, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2012.
- [2] Mayo, J. and Hans- Erik Blomgren, “Wood: the concrete of the 21st century”, *(Re)connect Seattle*, Seattle, 2018.
- [3] Winandy, Jerrold E., “Wood properties”, *Encyclopedia of Agricultural Science*, Charles J. Artzen (ed.), Academic Press, Orlando, FL, Vol. 4, p. 554, October 1994.
- [4] Song, Jianwei et al., “Processing bulk natural wood into a high-performance structural material”, *Nature*, Vol. 554, pp. 224, February, 2018.
- [5] Berglund, Lars A. and Ingo Burgert, “Bioinspired Wood Nanotechnology for Functional Materials”, *Advanced Materials*, Vol. 30, pp. 17042285, May 10, 2018.
- [6] Li, Yuanyuan et. al., “Luminiscente, Transparent Wood”, *Advanced Optical Materials*, Vol. 5, No. 1, 1600834, January 4, 2018.
- [7] PARTES DE LA MADERA, [Online], Available: <https://tailaketa.wordpress.com/2014/09/24/partes-de-la-madera/>, [Accessed: 25-Sep-2019].
- [8] PARTES DEL TRONCO, [Online], Available: <http://luismibarrios.blogspot.com/p/partes-del-tronco-del-arbol.html>, [Accessed: 25-Sep-2019].
- [9] Hill, Callum, *Wood modification. Chemical, Thermal ad Other Processes*, John Wiley, Chichester, pp. 20, 2006.

- [10] Militz, Holger and Stig Lander, “Challenges in wood modification technology on the way to practical applications”, *Wood Materials Science and Technology*, Vol. 4, Nos. 1 - 2, pp. 23, 2014.
- [11] Dost, William A., *Wood Detailing for Performance*, GRDA Publications, Pensacola, 1990.
- [12] Tiemann, H. D., “The effect of different methods of drying on the strength of wood”, *Lumber World Review*, Vol. 28, No. 7, pp. 19, 1915.
- [13] Kollman, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer Verlag, Berlin, 1936.
- [14] Morsig, N., “Densification of wood. The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain”, *Institute for Bærende Konstruktioner og Materialer*, Department of structural engineering and materials, Technical University of Denmark, Copenhagen, pp. 79, 2000.
- [15] Stamm, A. J. and Hansen, L. A., “Minimizing wood shrinkage and swelling. Effect of heating in various gases”, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 29, No. 7, pp. 831, 1937.
- [16] Seborg, R., R. Millet and A. Stamm, “Heat-stabilized compressed wood. Saypack”, *Mech. Eng.*, Vol. 67, pp. 25, 1945.
- [17] Seborg, R., H. Tarkow and A. Stamm, “Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood”, *J. For. Product Res. Soc.*, Vol., No. 9, pp. 59, 1953.
- [18] Kollmann F. and Schneider, A., “On the sorption behavior of heat stabilized wood”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 21, No. 3, pp. 461, 1963.
- [19] Kollmann, F. and Fengel, D., “Changes in the chemical composition of wood by heat treatment”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 12, pp. 77, 1965.
- [20] Noack, N., “Über die Heisswasserbehandlung von Rotbuchenholz im Temperaturbereich von 100 bis 180° C”, *Holz Holzverwer*, Vol. 21, No. 1, pp. 118, 1969.
- [21] Fengel, D., “On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200° C – Part 1”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 24, pp. 9, 1966.
- [22] Fengel, D., “On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200° C – Part 2”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 24, pp. 98, 1966.
- [23] D’Jakonov, K. and Koneplava, T., “Moisture absorption by Scots Pine wood after heat treatment, Lsn Z”, *Archangel’sk*, Vol. 10, No. 1, 1967.
- [24] Nikolov, S. and Enceev, E., “Effect of the heat treatment on the sorption dynamics of beech wood”, *Nauc. Trud. Lesoteh.*, Vol. 14, No. 3, p. 71, 1967.
- [25] Burmester, A., “Investigation on the dimension stabilization of Wood”, *Bundesanstalt für Materialprüfung*, Berlin- Dalhen, pp. 50, 1973.
- [26] Burmester, A., “Zur Dimensionstabilisierung von Holz”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 33, pp. 333, 1975.
- [27] Rusche, H., “Thermal degradation of Wood at temperatures up to 200 °C – Part I”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 31, pp. 273, 1973.
- [28] Rusche, H., “Thermal degradation of Wood at temperatures up to 200 °C – Part I”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 31, pp. 307, 1973.
- [29] Giebeler, E., “Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte Wärme Druck-Behandlung”, *Holz Roh – Werkst*, Vol. 41, pp. 87, 1983.
- [30] Hillis, H., “High temperature and chemical effects on Wood stability – Part. I. General considerations”, *Wood Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 281, 1984.
- [31] Elder, T., “The pyrolysis of wood”, *Wood and Cellulosic Chemistry*, Hon, D.N.S. and Shiraishi, N. (eds.), Marcel Dekker, New York, pp. 665, 1991.
- [32] Md. Tariqur Rabbani Bhuiyan, N. Hirai and N. Sobue, “Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions”, *J. Wood Sci.*, Vol. 46, pp. 431, 2000.
- [33] Viitanen, H. et al., “The effect of heat treatment on the properties of spruce. Document No. IRG/WP 94-40032, International Research Group on Wood Preservation, Stockholm, 4 pp, 1994.

- [34] Tjeerdsma, B. et al.H., “Characterization of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement”, *Holz Roh-Werkst*, Vol. 56, pp. 149, 1998.
- [35] Dirol, D., and Guyonnet, R. “Durability by rectification process”, *International Research Group Wood Pre*, Section 4-Processes, N° IRG/WP 93-40015, Stockholm, 1993.
- [36] Sailer, M. et al., “Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment”, *International Research Group Wood Pre*, Section 4-Processes, N° IRG/WP 00-40162, Stockholm, 2000.
- [37] Kamdem, D. P., A. Pizzi and A. Jermannaud, “Durability of heat-treated wood”, *Holz als Roh und Werkstoff*, Vol. 60, pp.1, 2002.
- [38] Pétrissans M., Gérardin P., Elbakali, D., Serraj, M., “Wettability of heat treated wood”, *Holzforschung*, Vol. 57, pp. 301, 2003.
- [39] Gérardin, P. et al., “Evolution of wood surface free energy after heat treatment”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, pp. 653, 2007.
- [40] Hakkou, M. et al, “Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 89, pp. 1, 2005.
- [41] Hakkou, M. et al, “Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, pp. 396, 2006.
- [42] Nguila Inari, G. et al., “Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, pp. 997, 2007.
- [43] Esteves, B. M., Domingos, I. J., and Pereira, H. M., “Pine wood modification by heat treatment in air”, *BioRes.*, Vol. 3, No. 1, pp. 142, 2008.
- [44] Vernois, Michel, *Heat treatment of wood in France –state of the art*, Centre Technique du Bois et de l’Ameublement, Paris, pp. 3, 2007.
- [45] Dos Santos, J. A., “Mechanical behaviour of Eucalyptus Wood modified by heat”, *Wood Science and Technology*, Vol. 34, pp. 39, March 2000.
- [46] Jun Li Shi, D. Kocaefe and J. Zhang, “Mechanical behaviour of Quebec wood species heat-treated using ThermoWood process”, *Holz Roh Werkst*, Vol. 65, pp. 258, 2007.
- [47] Korkut, S., T. Dundar and M. Akgüi, “The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood”, *Bioresource Technology*, Vol, 99, 2008.
- [48] Song, J. et al., “Processing bulk natural wood into a high performance structural material”, *Nature*, Vol. 554, pp. 224, February, 2018.
- [49] Matuana, L. M. and P. A. Heiden, “Wood Composites”, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Vol 12, pp. 521, John Wiley, New York, 2004.
- [50] Ariffin, N. A., et al., “A comparative study of physical and mechanical properties of wood plastic composite produced from different agriculture residues”, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bandung, Indonesia, March 6-8, pp. 29-77, 2018.
- [51] Patterson, J., “New opportunities with wood – flour – foamed PVC”, *J. Vinyl Additive Technol.*, Vol. 7, No. 3, pp. 138, 2001.
- [52] Asim, M. et al., “Review on pineapple leaves fiber and its composites”, *International Journal of Polymer Science*, pp. 1, 2015.
- [53] Fowler, P. A. et al., “Review biocomposites: technology, environmental credentials and market forces”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 86, No. 2, pp.17-81, 2006.
- [54] Valles- Rosales, D. J. et al., “Analysis of the mechanical properties of wood-plastic composites based on agriculture chili paper waste”, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, Vol., 18 No. 1, pp. 43, 2016.

- [55] Arbintarso, E. S. et al., “Simulation and Failure Analysis of Car Bumper Made of Pineapple Leaf Fiber Reinforced Composite”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 306, 2018.
- [56] Rowell, R.M., “Acetylation of wood: A journey from analytical technique to commercial reality”, *Forest Products Journal*, Vol. 56, No. 9, pp. 4, 2006.
- [57] Segerholm, K., *Characteristics of wood plastic composites based on modified wood. Moisture properties, biological resistance and micromorphology*, Doctoral Thesis, KTH Building Materials Technology, Stockholm, pp. 35, 2012.
- [58] Valencia G., A. “Los biomateriales y la Ingeniería”, *Primer Congreso Nacional de Biomateriales*, Universidad de Antioquia, Medellín, pp. 1, septiembre, 2008.
- [59] Stamm, A. J. and Millett, M.A., "The Internal Surface of Cellulosic Materials", *J. Phys. Chem.*, Vol. 45, pp. 43, 1941.
- [60] Burgert, I. et al., “Bio-inspired functional wood-based materials – hybrids and replicates”, *Int. Mater. Rev.*, Vol. 60, p. 431, 2015.
- [61] Jin, H. et al, “Superhydrophobic and superoleophobic nanocellulose aerogel membranes as bioinspired cargo carriers on water and oil”, *Langmuir*, Vol. 27, No. 5, pp. 19-30, 2011.
- [62] Tingaut, P., T. Zimmermann, G. Sebe, “Cellulose nanocrystals and microfibrillated cellulose as building blocks for the design of hierarchical functional materials”, *J. Mater. Chem.*, Vol. 22, No. 38, pp. 20-105, 2012.
- [63] Toivonen, M. S. et al., “Water-resistant, transparent hybrid nanopaper by physical cross-linking with chitosan”, *Biomacromolecules*, Vol. 16, No. 3, pp. 10-62, 2015.
- [64] Zhou, P. et al, “Strong Nanocomposite Reinforcement Effects in Polyurethane Elastomer with Low Volume Fraction of Cellulose Nanocrystals”, *Macromolecules*, Vol. 44, No. 11, p. 22-44, 2011.
- [65] Norgren, M. and H., “Edlund, Lignin: Recent advances and emerging applications”, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, Vol.19, No. 5, pp. 4-9, 2014.
- [66] Zhang, Z. et al. “Ultralightweight and Flexible Silylated Nanocellulose Sponges for the Selective Removal of Oil from Water”, *Chem. Mater.*, Vol. 26, No. 8, pp. 26-59, 2014.
- [67] Bamber, R. K., “Heartwood, its function and formation”, *Wood Sci. Technol.*, Vol. 10, No. 1, pp. 1, 19-76.
- [68] Hillis, W. E., “Chemical aspects of heartwood formation”, *Wood Sci. Technol.* Vol. 2, No. 4, pp. 241, 19-68.
- [69] Magel, E. A. et al., “Formation of heartwood substances in the stem of *Robinia pseudoacacia*. L. I. Distribution of phenylalanine ammonium lyase and chalcone synthase across the trunk”, *Trees - Struct. Funct.*, Vol. 5, No. 4, pp. 2-3, 1991.
- [70] Taylor, A. M., B. L. Gartner and J. J. Morrell, “Heartwood formation and natural durability - A review”, *Wood Fiber Sci.*, Vol. 34, No. 4, p. 5-87, 2002.
- [71] Speck, T. and I. Burgert, “Plant Stems: Functional Design and Mechanics”, *Annu. Rev.*, Vol. 41, pp. 1-69, 2011.
- [72] Speck, T., N. Rowe, and H.-C. Spatz, “Pflanzliche Achsen- Hochkomplexe Verbundstrukturen mit erstaunlichen mechanischen Eigenschaften”, *Akad. d. Wiss. und d. Lit., Mainz, Fischer Verlag*, Vol. 10, Stuttgart, pp. 1-10, 1996.
- [73] Deveci, I. et al., “Effect of SiO₂ and Al₂O₃ treatment on thermal behavior of oriental beech wood”, *Wood Research*, Vol. 63, No. 4, pp. 5-73, 2018.
- [74] Bak, M., F. Molnár and R. Nemeth, “Improvement of dimensional stability of wood by silica nanoparticles”, *Wood Material Science & Engineering*, Vol. 14, No 1, pp. 4-8, 2019.
- [75] Papadoupulos, A. N., “Nanomaterials and Chemical Modifications for Enhanced Key Wood Properties: A Review”, *Nanomaterials*, Vol. 9, No. 4, pp. 6-7, 2019.

- [76] Srinivas, K. and K. K. Pandey, “Enhancing Photostability of Wood Coatings Using Titanium Dioxide”, *Wood is Good. Current Trends and Future Prospects in Wood Utilization*, Pandey K. K. et al. (eds.), Springer, Singapore, pp. 2-51, 2017.
- [77] Fink, S., “Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure”, *Holzforschung*, Vol. 46, No. 5, pp. 403, 1992.
- [78] Li, Y. et al., “Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance”, *Biomacromolecules*, Vol. 17, No. 4, pp. 13-58, 2016.
- [79] Zhu, M. W. et al., “Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites”, *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 26, pp. 51-81, 2016.
- [80] Li, T. et al. “Wood composite as an energy efficient building material: Guided sunlight transmittance and effective thermal insulation”, *Adv. Energy Mater.*, Vol. 6, pp. 16-22, 2016.
- [81] Zhu, M. W. et al., “Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells”, *Nano Energy*, Vol. 26, pp. 3-32, 2016.
- [82] Li, Y. Y. et al., “Transparent Wood: Luminescent Transparent Wood”, *Adv. Opt. Mater.*, Vol. 5, pp. 16-34, 2017.
- [83] Vasileva, E. et al., “Lasing from organic dye molecules embedded in transparent wood”, *Adv. Opt. Mater.*, Vol. 5, No. 10, pp.17-57, 2017.
- [84] Gan, W. T. et al.. “Luminescent and transparent wood composites fabricated by PMMA and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@YVO}_4\text{:Eu}^{3+}$ nanoparticles impregnation”, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 5, pp. 3855, 2017.
- [85] Gan, W.T. et al.. “Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 52, No. 6, pp. 21-33, 2017.
- [86] Li, Y. et al., “Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance”, *Biomacromolecules*, Vol. 17, No. 4, pp. 13-58, 2016.
- [87] Rekola, Jami, *Wood as a model material for medical biomaterials*, Thesis for the degree of Dentist, University of Turku, Turku, Finland, 2011.
- [88] Liu, J., *Wood-derived biomaterials for biomedical applications*, Dissertation, Abo Akademi University, Turku, 2016.
- [89] Burgert, I. et al, “Biomaterial wood: wood-based and bioinspired materials”, *Secondary Xylem Biology*, Y. S. Kim, R. Funada and A. P. Singh (eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 259, 2016.
- [90] Mittal, N. et al., “Multiscale Control of Nanocellulose Assembly: Transferring Remarkable Nanoscale Fibril Mechanics to Macroscale Fibers”, *ACS Nano*, Vol. 12, No. 7, pp. 63-78, 2018.