



*El proyecto ORHI (EFA142/16) es co-financiado al 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020).*

**Estudio de nuevos materiales de alto valor añadido a partir de biomasa para aplicación en el desarrollo industrial.**

**BiOcore**

**Noviembre 2020**

## Indice

1. Introducción
  - 1.1 El fin de la economía lineal
  - 1.2 Hacia una economía circular
  - 1.3 Alternativas “verdes”
    - 1.3.1 Materiales orgánicos: madera densificada
    - 1.3.2 Biocompuestos y materiales con base biológica: material de micelio
2. La madera densificada
  - 2.1 Procesamiento de madera natural en un material estructural de alto rendimiento
  - 2.2 Materiales de celulosa deslignificada y densificada con excelentes propiedades de tracción para una ingeniería sostenible
  - 2.3 Compuestos de madera deslignificada con infiltración de polímero que superan la regla de las mezclas
  - 2.4 Fabricación y diseño de compuestos de alto rendimiento a base de madera
3. El material de micelio
  - 3.1 La formación del biocompuesto
  - 3.2 El proceso de cultivo del material de micelio
  - 3.3 Análisis de los materiales de micelio y propiedades
    - 3.3.1 Material de micelio como aislamiento térmico
    - 3.3.2 Material de micelio como aislamiento acústico
    - 3.3.3 Material de micelio como panel sándwich
    - 3.3.4 Material de micelio como estructura
  - 3.4 Resumen de las propiedades del material del micelio
  - 3.5 Conclusiones
  - 3.6 Otras posibles aplicaciones: material de micelio como aligeramiento en forjados unidireccionales y bidireccionales
    - 3.6.1 La bovedilla de poliestireno expandido (EPS)
      - 3.6.1.1 Introducción
      - 3.6.1.2 Ventajas e inconvenientes del uso de la bovedilla de EPS
      - 3.6.1.3 Normativa y características de las bovedillas de EPS
    - 3.6.2 La bovedilla de material de micelio
      - 3.6.2.1 Introducción
      - 3.6.2.2 Características del material de micelio
    - 3.6.3 Ventajas e inconvenientes de bovedillas de micelio frente a bovedillas de EPS
    - 3.6.4 Conclusiones
4. Tecnologías de fabricación aditiva para productos poliméricos derivados del estudio.
5. Bibliografía

## **1. Introducción**

### **1.1. El fin de la economía lineal**

Uno de los desafíos de la sociedad de hoy en día es la transformación de la economía actual en una economía sostenible. Por un lado, nuestra economía está basada en los derivados del petróleo, una economía lineal que utiliza corrientes que la dirigen al agotamiento de los recursos fósiles. Por otro lado, se conoce bien que todos estos derivados del petróleo generan dióxido de carbono a lo largo de toda su cadena de valor (Cerimi, Akkaya, Pohl, Schmidt, & Neubauer, 2019). Para esta transformación, el uso de estas fuentes no renovables se tiene que reducir tanto para la producción de materiales como de productos de consumo (Appels et al., 2019).

En los últimos siglos, la industria se ha desarrollado principalmente dependiente de los recursos que proceden de la excavación y la extracción. Por ejemplo, hoy en día, el hormigón armado es el material de construcción más producido a escala mundial. La excavación y la extracción, en contraste con el cultivo, tiene una desventaja significativa: los materiales excavados y extraídos no se regeneran. Los agregados que se usan para la mezcla del hormigón, por ejemplo la arena y la grava, se transforman y se pierden para siempre sin posibilidad de recuperarlos en su estado original. Otros minerales y metales también están afectados por estos estándares centrados en la excavación y la práctica de la industria de hoy en día. Plomo, zinc, estaño, incluso cobre y hierro, están en peligro de agotamiento si continúa esta mentalidad actual de “coger, hacer y disponer”. Las compañías cosechan y extraen los materiales, los usan para manufacturar un producto, venden este producto al consumidor que finalmente lo tira cuando ya no sirve más para su propósito. Y este proceso se repite y, cada vez, a un ritmo cada vez más acelerado (Heisel et al., 2017) (Macarthur, 2020).

Debido a este agotamiento de los recursos y al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, hay una necesidad urgente de reemplazar materiales procedentes de la excavación y extracción, materiales cuya producción implica un gran coste energético y ambiental, por materiales renovables (M. Frey, Schneider, Masania, Keplinger, & Burgert, 2019).

Muchas compañías empiezan a darse cuenta de que este sistema lineal incrementa su exposición a los riesgos, notablemente más altos en los precios de los recursos y la interrupción de los suministros. Contra este transfondo, una alternativa que se presenta es un modelo de industria que separa los ingresos de la entrada de material: el concepto de economía circular (Macarthur, 2020).

### **1.2. Hacia una economía circular**

La economía circular es un sistema de industria que es restaurativo o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de “final de vida” por renovación, cambios hacia el uso de energías renovables, eliminación del uso de químicos tóxicos, que alteran

su reutilización, y el propósito de la eliminación de residuos, a través de un mejor diseño de materiales, productos, sistemas y, con todo esto, modelos de negocio (Macarthur, 2020).

En relación a la industria, el requerimiento clave en base a esta economía circular sería que los componentes deben ser diseñados, fabricados y construidos de tal forma que puedan ser desmontados, separados y, de una manera limpia, devueltos a sus ciclos biológicos o técnicos respectivos para maximizar la recuperación y reutilización de los materiales tras su ciclo de vida. Esto implicará un nuevo diseño de los componentes habituales, el desarrollo de sistemas de juntas y uniones nuevos e innovadores, o el descarte de ligantes y compuestos no reciclables (Heisel et al., 2017)

### **1.3. Alternativas “verdes”**

Como consecuencia de la creciente demanda de materiales y procesos productivos “verdes”, se ha desarrollado una extensa investigación sobre los materiales orgánicos y los llamados biocompuestos y materiales con base biológica.

#### **1.3.1. Materiales orgánicos: madera densificada**

La madera puede ser un material clave para esta transición hacia una sociedad y economía sostenibles porque es orgánica y además captura CO<sub>2</sub> durante su crecimiento. Hoy en día la madera natural se obtiene fácilmente en grandes cantidades a bajo coste y combina buenas propiedades mecánicas y un diseño ligero. Sin embargo, hay ciertas limitaciones para los materiales de madera cuando se habla de altas prestaciones estructurales (M. Frey et al., 2019)

La madera es un producto de crecimiento natural. Como tal, la estructura de su tejido y la densidad pueden variar substancialmente de una especie a otra e incluso, en el tronco de un árbol individual. Además las adaptaciones mecánicas durante la vida del árbol o la presencia de elementos naturales como los nudos dan como resultado una gran variabilidad. Esto conlleva desconfianza hacia la fiabilidad de la madera y su aplicación en altas prestaciones. La densificación de la madera sería un procedimiento que permitiría alcanzar una mayor homogeneidad de la madera preservando la direccionalidad estructural. Esto es debido a que la densidad es uno de los factores claves implicados en las propiedades mecánicas de los materiales. Comprimiendo muestras de madera se alcanzan unos niveles de densidad altos y homogéneos con la consecuente y significativa mejora de las propiedades mecánicas. La deslignificación parcial o total de la madera junto con la humedad facilitan el proceso de densificación (Marion Frey et al., 2018).

#### **1.3.2. Biocompuestos y materiales con base biológica: material de micelio**

Los biocompuestos son materiales donde un biopolímero o un polímero bio-derivado se refuerza con fibras naturales. Los materiales con base biológica se definen como materiales que contienen al menos un componente que es producido sosteniblemente

y son completamente biodegradables (Lelivelt, Lindner, Teuffel, & Lamers, 2015). El mayor atractivo de estos materiales es la posibilidad de explotar los residuos y basuras biológicas como los serrines, cáscaras, pajas residuales, etc. Estos residuos y basuras se revalorizan en lugar de ser descartados, de acuerdo con uno de los principios de la economía circular (Girometta et al., 2019).

Los compuestos de base biológica consisten en una matriz dúctil reforzada, lo que le otorga un alto rendimiento a bajo precio y una gran versatilidad para diseñar materiales para aplicaciones específicas. Muchos de los compuestos de hoy en día tienen el refuerzo natural pero, la matriz a menudo está hecha de petroquímicos. Uno de los biomateriales que podría tener el potencial de contribuir a esta nueva economía reemplazando a productos con base de petróleo es el material con base de micelio: su matriz es totalmente biológica y se produce a bajo coste (Lelivelt et al., 2015).

## **2. La madera densificada**

En este apartado se presentan distintos procedimientos publicados para el tratamiento y procesado de la madera natural que permiten incrementar las propiedades de las piezas mecánicas a través técnicas de densificación y deslignificación.

### **2.1. Procesamiento de madera natural en un material estructural de alto rendimiento (Song et al., 2018)**

En el trabajo realizado por Song y colaboradores se presenta un método para transformar madera natural en un material con altas prestaciones estructurales con un incremento superior a más de diez veces en solidez, dureza y resistencia a bala, y con una mayor estabilidad dimensional.

Se realiza en dos etapas, eliminando parcialmente lignina y hemicelulosa de la madera natural mediante un proceso de hervido en una mezcla acuosa de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, seguido de una presión en caliente que lleva al colapso de las paredes de las células y a la completa densificación de la madera natural con un alto alineamiento de las nanofibras de celulosa.

Este proceso se puede realizar con diferentes especies de madera obteniendo un material de bajo precio, ligero, con altas prestaciones y con una solidez mayor que la mayoría de los metales y aleaciones estructurales.

El procedimiento detallado es el siguiente:

1. Se preparan muestras de tilo, roble, álamo, cedro rojo y pino blanco de dimensiones 120x44x44 mm<sup>3</sup>.
2. Se prepara una solución acuosa de una mezcla de 2,5 M de NaOH y 0,4 M Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> y se lleva a ebullición.
3. Se sumerge la muestra en la solución en ebullición durante 7 h. Ajustando los tiempos de ebullición se obtienen muestras de madera de diferentes grados de deslignificación.

4. Después de la deslignificación parcial, se enjuaga la muestra en agua desionizada hirviendo varias veces para eliminar los químicos.
5. Se colocan las muestras en una prensa a 100°C bajo una presión de aproximadamente 5 MPa durante 1 día para obtener la muestra de madera densificada (115,6x46,5x9,5 mm<sup>3</sup>).

El tratamiento químico de la deslignificación permite una reducción substancial de la lignina y hemicelulosa que contiene la madera natural pero sólo una reducción modesta del contenido de la celulosa (Figura 1).

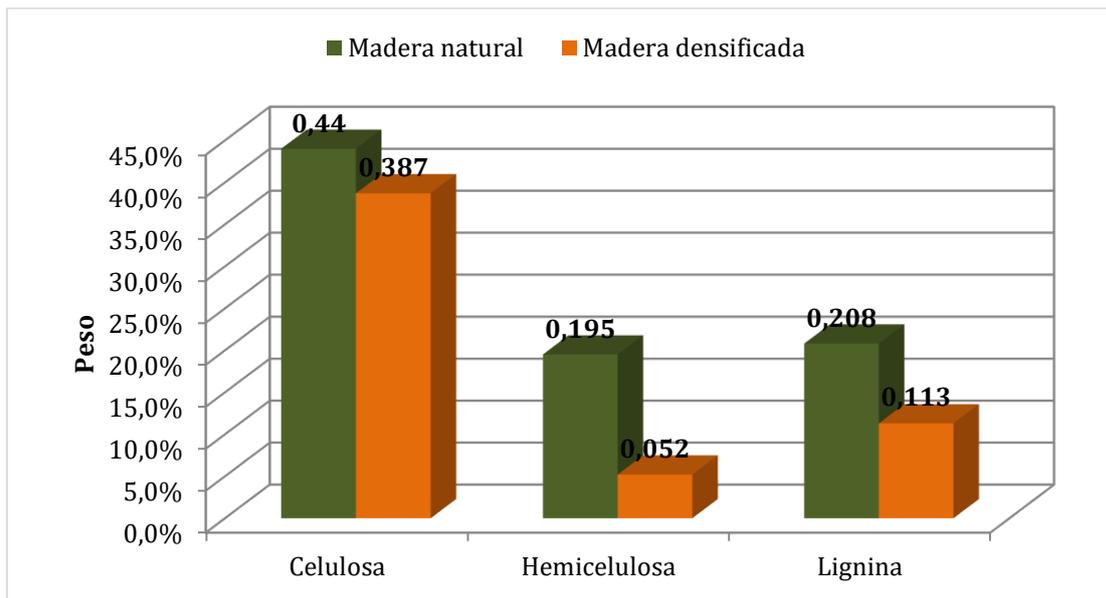


Figura 1. El tratamiento químico conlleva una extracción substancial de la lignina (antes de deslignificación 20,8%; después 11,3%) y hemicelulosa (antes 19,5%; después 5,2%) en la madera natural, pero sólo una cantidad modesta de disolución del contenido de celulosa (antes 44%; después 38,7%).

Con la eliminación parcial de lignina y hemicelulosa de las paredes de la células, la madera se vuelve más porosa y menos rígida. Tras aplicar una presión en caliente a 100°C perpendicular a la dirección de crecimiento de la madera, las paredes porosas de las células colapsan completamente, resultando una pieza de madera densificada que reduce su espesor en aproximadamente hasta el 20% y aumenta su densidad en 3 veces (Figura 2).

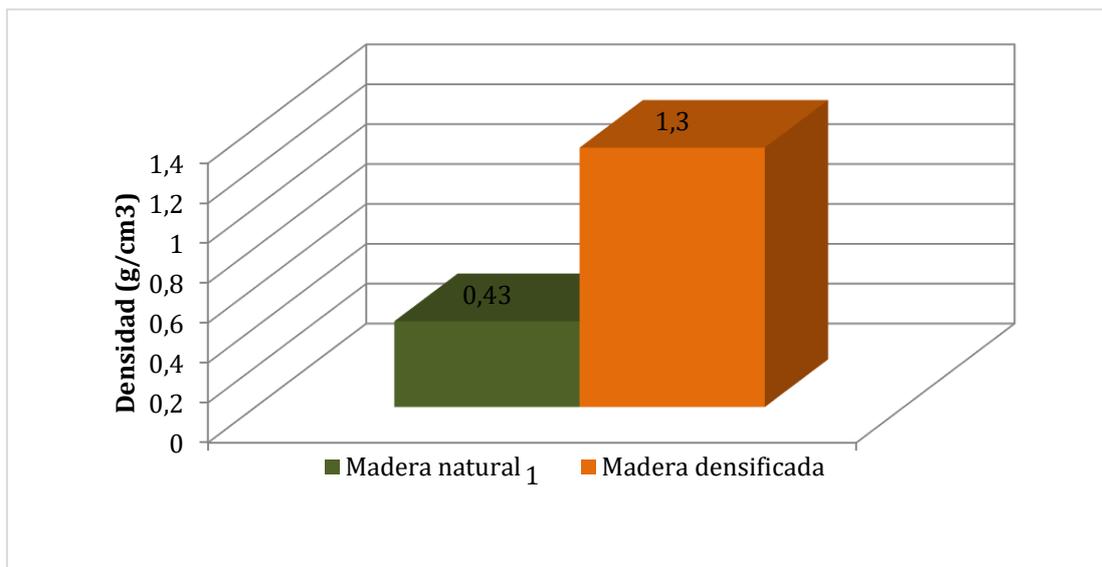


Figura 2. Comparación de las densidades de la madera natural (0,43 g/cm<sup>3</sup>) y la madera densificada (1,3 g/cm<sup>3</sup>).

La madera densificada tiene una microestructura única, las paredes de las células completamente colapsadas están firmemente entrelazadas a lo largo de la sección perpendicular y densamente compactas a lo largo de la dirección longitudinal. En la madera densificada las nanofibras de celulosa permanecen altamente alineadas, similar a la madera natural, pero mucho más densamente compactas.

Las propiedades mecánicas de la madera densificada no sólo son significativamente superiores a las de la madera natural sino que también superan las de otros materiales de uso estructural como plástico, acero y aleaciones.

La madera densificada demuestra una resistencia a la tracción de 587 MPa que es 11,5 veces mayor que la de la madera natural sin tratar, y también mucho más alta que la de los plásticos típicos, como nailon, policarbonato, poliestireno y epoxi, y otras maderas densificadas. Se encontró que la eliminación parcial de lignina permite la mayor densidad de la madera resultante con la mejor resistencia a la tracción y trabajo de fractura (Tabla 1, Figuras 3 y 4).

El gran aumento de la resistencia a la tracción de la madera densificada no va acompañado de una disminución de la tenacidad. Tanto el trabajo de fractura como la rigidez elástica de la madera densificada son más de diez veces mayores que los de la madera natural (Tabla 1, Figura 5a).

Las pruebas de resistencia al impacto Charpy de la madera densificada arrojan una tenacidad al impacto de 11,41 ± 0,5 J/cm<sup>2</sup>, 8,3 veces mayor que la de la madera natural (1,38 ± 0,3 J/cm<sup>2</sup>) (Figura 5c). La dureza al rayado y el módulo de dureza de la madera densificada son 30 y 13 veces mayores que los de la madera natural respectivamente (Figura 5b, d).

La resistencia a la flexión de la madera densificada es aproximadamente 6 y 18 veces mayor que la de la madera natural a lo largo (Figura 6) y perpendicular a la dirección de crecimiento (Figura 7) respectivamente.

La resistencia a la compresión de la madera densificada es aproximadamente 5,5 veces y de 33 a 55 veces mayor que la de la madera natural a lo largo y perpendicular a la dirección de crecimiento, respectivamente (Figuras 9, 10 y 11).

Se encontró también que la eliminación parcial de lignina permite una mayor resistencia a la compresión axial (Figura 12). Sin eliminar la lignina es difícil presionar en caliente a la madera natural para obtener una madera completamente compactada. Con una deslignificación total, la madera puede aplastarse fácilmente durante la presión en caliente probablemente debido a la ausencia de lignina como pegamento.

La madera densificada es estable bajo el ataque de la humedad. Por ejemplo, sometida a 95% de humedad relativa durante 128 horas, la madera densificada se hincha produciendo un aumento de sólo 8,4% en el espesor, con sólo una modesta caída en la resistencia a tracción (493,1  $\pm$  20,3 MPa, aún 10,6 veces mayor que la de la madera natural en ambiente natural). Además, al aplicar un tratamiento standard en la superficie (pintura), la madera densificada se muestra inmune a la humedad (Figuras 13 y 14).

Respecto a la fractura, la madera densificada es mucho más dura que la madera natural, la energía que se necesita para fracturar la madera densificada es mucho mayor que la necesitada en la madera natural.

Una comparación entre la superficie de fractura por tracción de la madera natural y la de la madera densificada ofrece información sobre los mecanismos de endurecimiento y fortalecimiento en la madera densificada. La falla por tracción de la madera natural se inicia por un deslizamiento relativo entre las luces de madera abiertas, seguido por el arrancamiento y el desgarro de la lámina de madera a lo largo de la superficie de fractura, mientras que la falla por tracción de la madera densificada resulta del deslizamiento relativo entre las paredes de las celdas de madera densamente empaquetadas seguido de la extracción y fractura de las paredes de las celdas a lo largo de la superficie de fractura.

Las paredes de celdas de madera densamente empaquetadas y entrelazadas en la madera densificada a microescala conducen a un alto grado de alineación de las fibras de celulosa y, por tanto, aumentan drásticamente el área interfacial entre las nanofibras. A escala molecular, debido a los ricos grupos hidroxilo en las cadenas moleculares de celulosa, el deslizamiento relativo entre las paredes de las celdas de madera densamente empaquetadas implica una enorme cantidad de eventos repetidos de formación, ruptura y reformado de enlaces de hidrógeno a escala molecular. En consecuencia, la energía total necesaria para fracturar la madera densificada es mucho mayor que la necesaria para fracturar la madera natural. En otras palabras, la madera densificada es mucho más resistente que la madera natural.

Se muestra la resistencia a la tracción de la madera densificada en la dirección T (Figura 15).

Estas maderas densificadas fuertes y resistentes pero livianas prometen como materiales para armaduras y absorción de energía balística de bajo coste. Se realizaron pruebas balísticas en madera natural, madera densificada de una sola capa y madera densificada laminada en cinco capas con orientaciones de fibra alternando 90° de capa a capa. La absorción de energía balística por unidad de espesor para la madera densificada fue de 4,3 +- 0,08 kJ/m, un aumento de siete veces respecto a la madera natural (Figura 16). La abertura de perforación por el proyectil de acero es menor que en la madera natural y la superficie de la madera está muy agrietada lo que indica una unión mucho más fuerte entre las paredes de celdas de madera altamente compactadas. La resistencia balística de la madera densificada multicapa es aún mayor, la absorción de energía balística fue de 6,0 +- 0,1 kJ/m, diez veces mayor que la madera natural.

## **2.2. Materiales de celulosa deslignificada y densificada con excelentes propiedades de tracción para una ingeniería sostenible (Marion Frey et al., 2018)**

En este estudio de Frey y colaboradores se presenta un material obtenido de la combinación de deslignificación total y densificación de la madera y que da como resultado un material de alto rendimiento.

Se optimizó un proceso de deslignificación con peróxido de hidrógeno y ácido acético para deslignificar los bloques de madera y conservar la direccionalidad estructural altamente beneficiosa de la madera. Posteriormente estos bloques se densificaron en un proceso que combina compresión y cizallamiento lateral para obtener un material celulósico muy compacto con fibras enredadas mientras se conserva la orientación unidireccional de las fibras.

Se analizaron las propiedades de los materiales así obtenidos resultando unas propiedades de tracción superiores en comparación con la madera natural original.

## **2.3. Compuestos de madera deslignificada con infiltración de polímero que superan la regla de las mezclas (M. Frey et al., 2019)**

Mediante la deslignificación y posterior densificación de la madera se consigue un material que posee una resistencia a la tracción alta debido a la preservación del alineamiento de las fibras, pero con bajas propiedades mecánicas a flexión y que no puede ser utilizado en condiciones de humedad por su propensión a absorber agua.

En este trabajo Frey y colaboradores desarrollan un compuesto con base de madera que, en primer lugar es deslignificada para mantener su estructura, para posteriormente ser infiltrada con polímeros y densificada por vacío, resultando un material de alta dureza y solidez. Debido a la compresibilidad de las fibras de celulosa deslignificadas,

se pueden obtener compuestos con contenido de volumen de fibra muy altos, de hasta el 80%, lo que conduce a una rigidez y resistencia a la tracción muy altas, que superan con creces el límite superior de la regla de las mezcla debido a una transferencia de tensión mejorada a través de las interfaces fibra-fibra entrelazadas mecánicamente combinada con la rigidez que proporciona la fase matriz que ayuda aún más a la transferencia de tensión entre celdas de madera próximas a través de sus huecos.

El procedimiento detallado utilizado por los investigadores fue el siguiente:

## 1. Deslignificación

1.1 Muestras de Picea de Noruega de 100x20x10 mm<sup>3</sup> y 100x20x5 mm<sup>3</sup>

1.2 Igual procedimiento resumido en el apartado anterior (Marion Frey et al., 2018)

1.3 Las muestras se mantienen a 65% humedad relativa y 20° C.

## 2. Infiltración

2.1 Las muestras se secan en horno a 65°C durante la noche.

2.2 Infiltración con un sistema de resina epoxy RIM235/RIMH238 (Hexion, USA) mediante inyección de resina al vacío (VARI) durante 90 min.

## 3. Densificación

3.1 La densificación se realiza en molde de transferencia de resina de compresión (CRTM) con tres cavidades para densificar 3 muestras al mismo tiempo bajo una presión isostática y para obtener un rango de contenido de volumen de fibra CVF desde 25% a 80% variando el espesor final de la muestra.

3.2 El molde se cubre con un antiadherente (Loctite770-NC Frekote, Henkel, Alemania). Los bordes se engrasan con grasa Motorex lithilum.

3.3 Se coloca una lámina de Teflon de 0,05 mm de espesor entre las muestras.

3.4 Se colocan las muestras en el molde y se añade una cantidad adicional de epoxy hasta alcanzar la cantidad de 50 g de epoxy por molde.

3.5 Las muestras se densifican usando LabEcon de presión caliente durante 5 horas a 60°C a una presión de aproximadamente 3 bar.

La eliminación de la lignina en las paredes celulares da como resultado una mayor porosidad de las paredes celulares en estado húmedo. Al secarse, las paredes de celdas de madera deslignificadas se encogen y las celdas vecinas entran en estrecho contacto entre sí, lo que lleva a la deformación celular. Esta deformación genera interfaces arrugadas que pueden actuar como enclavamientos mecánicos entre las celdas. Estos enclavamientos proporcionan una integridad estructural notable y una alta estabilidad mecánica. Además, en la deslignificación se retienen las cavidades en las células de la madera llamadas lúminas. Esta ruta puede aprovecharse para la infiltración de una matriz de resina en el armazón de celulosa que conduce a una fase de matriz infiltrada tridimensionalmente interconectada.

La relación entre la fase de celulosa y la fase de matriz aumenta con la densificación. En el estudio, los investigadores ajustaron el contenido de volumen de fibra CVF variando el espesor final del compuesto para lograr valores de CVF entre 18% sin densificación hasta 70-80% para muestras altamente densificadas. Las altas presiones durante el prensado en el molde CRTM permiten la eliminación de burbujas de aire en el epoxi y la infiltración total.

Para realizar los ensayos de tracción y flexión las muestras se acondicionan a 65% de humedad relativa y 20°C hasta que se obtiene una masa constante. Se testaron muestras de madera deslignificada reforzada con polímeros (MDRP) con contenidos de volumen de fibras (CVFs) de aproximadamente 25%, 50% y 70%. Estas muestras se compararon con muestras de madera natural (MN), madera deslignificada (MD) y compuestos de fibra de vidrio reforzado con polímeros (FVRP). El contenido alto de volumen de fibra CVF de 70% o más sólo se logró en los MDRP debido a la capacidad de densificación de la madera deslignificada.

Los resultados obtenidos muestran que las muestras de madera deslignificada reforzada con polímeros (MDRP) poseen una rigidez y resistencia a la tracción muy altas del orden de 70GPa y 600 MPa respectivamente debido a una combinación del engranaje mecánico entre células y un contenido de volumen de fibra CVF muy alto de más de 80%.

La rigidez a la tracción y la resistencia a la tracción aumentan con el aumento de CVF (Tabla 1). Se encontró que la tendencia es similar para los compuestos sin matriz (MD25% y MD50%), lo que implica que las interacciones fibra-fibra en CVF altos gobiernan la transferencia de tensión y permiten el logro de un rendimiento mecánico superior. Por lo tanto, la madera deslignificada proporciona un excelente andamio de refuerzo para compuestos de fase interpenetrante de alto rendimiento.

Además, la baja densidad de las fibras de celulosa da como resultado propiedades de tracción específicas altas, y los MDRP con un CVF alto incluso superan a materiales probados con respecto a las propiedades de tracción específicas. Los módulos elásticos de tracción, las resistencias y densidades de los MDRP y las muestras de referencia se informan en la Tabla 1 y la Figura 1.

Material	Rigidez tracción (GPa)	Resistencia tracción (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
MN	10,59	79,28	0,41
FVRP 25%	19,69	277,49	1,47
FVRP 50%	38,11	469,46	1,86
MD 25%	13,56	109,85	0,53
MD 50%	28,78	220,5	0,99
MDRP 25%	19,37	161,59	1,23
MDRP 50%	34,26	300,64	1,31
MDRP 70%	52,01	504,69	1,32

Tabla 1. Rigidez de tracción, resistencia a la tracción y densidad de las muestras medidas y valores de referencia en otros estudios.

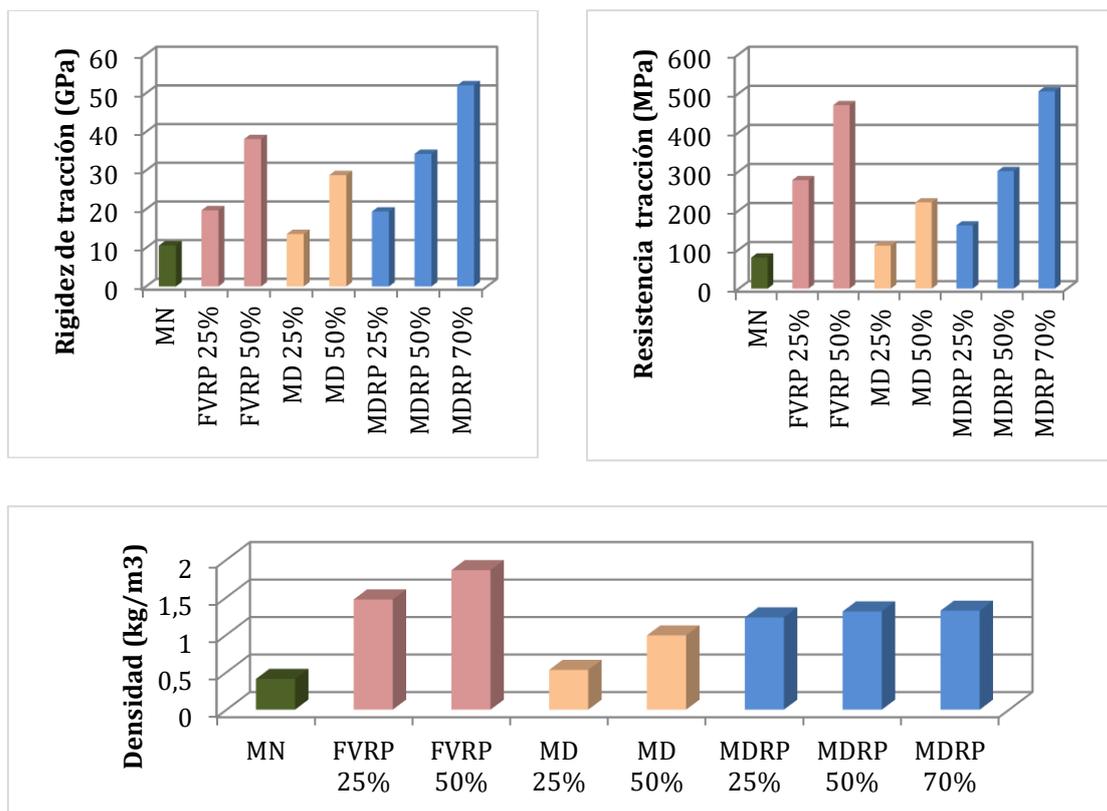


Figura 1. Rigidez de tracción, resistencia a la tracción y densidad de las muestras medidas y valores de referencia en otros estudios.

Para un estudio más a fondo del comportamiento mecánico de los compuestos MDRP se realizaron mediciones de flexión. En flexión, la influencia de la matriz es aún más pronunciada y los MDRP muestran una rigidez y resistencia a flexión mucho mayores en comparación con los MD no infiltrados que demuestra la importancia de la fase de polímero penetrante interconectada específicamente para esta condición de carga. Se encontró que MDRP tiene una rigidez a la flexión similar a la de FVRP aunque la resistencia a la flexión de FVRP es aproximadamente el doble de la resistencia a la flexión de MDRP (Tabla 2). Esto se puede explicar analizando las curvas de tensión-deformación (Figura 3). Los FVRP muestran una falla frágil dominada por tracción a 800-900 MPa, mientras que los MDRP exhiben una fuerte deformación plástica comenzando en el rango de 100-200 MPa antes de una fractura final de alrededor de 300 MPa. El MDRP falla en una mezcla de compresión y tracción. Las muestras de MD no infiltradas fallaron en la compresión y mostraron una meseta de alrededor de 100 Mpa. Por lo tanto, la matriz interpenetrante refuerza el andamio de la MD al rellenar el espacio vacío de la lúmina y ayuda a resistir fallas por compresión a bajos niveles de tensión. Debido a su menor densidad, los MDRP superan a los FVRP en términos de rigidez específica de flexión pero los FVRP tienen mayor resistencia específica a la flexión en comparación con los MDRP. Los módulos de flexión, resistencias y densidades se muestran en la Tabla 1 y Figura 1.

Material	Rigidez de flexión (GPa)	Resistencia flexión (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
MN	10,48	77,85	0,40
FVRP 25%	17,73	455,39	1,51
FVRP 50%	36,94	872,02	1,85
MD 25%	16,49	63,32	0,56
MD 50%	19,27	85,63	0,99
MDRP 25%	19,55	200,05	1,17
MDRP 50%	35,84	356,27	1,30
MDRP 70%	46,76	421,63	1,32

Tabla 2. Rigidez de flexión, resistencia a la flexión y densidad de las muestras medidas y valores de referencia en otros estudios.

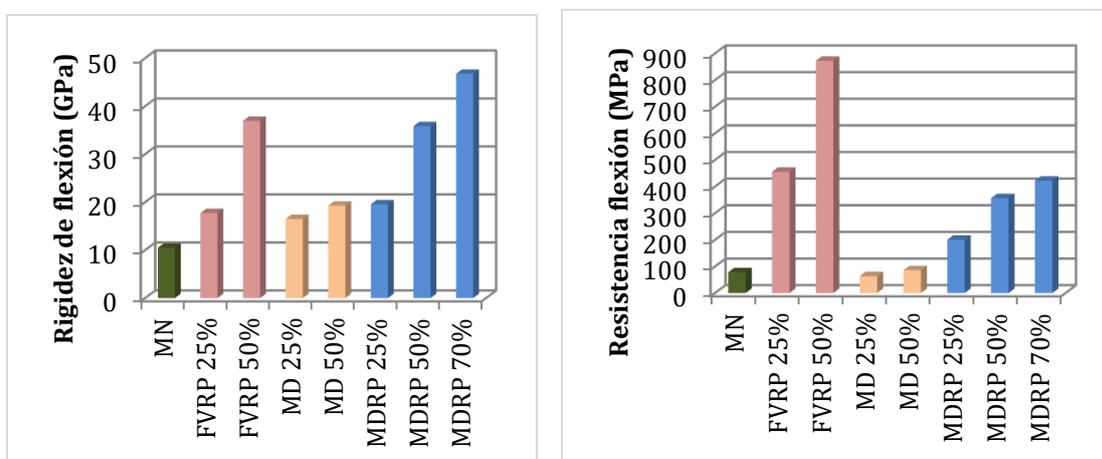


Figura 2. Rigidez de flexión y resistencia a la flexión de las muestras medidas y valores de referencia en otros estudios.

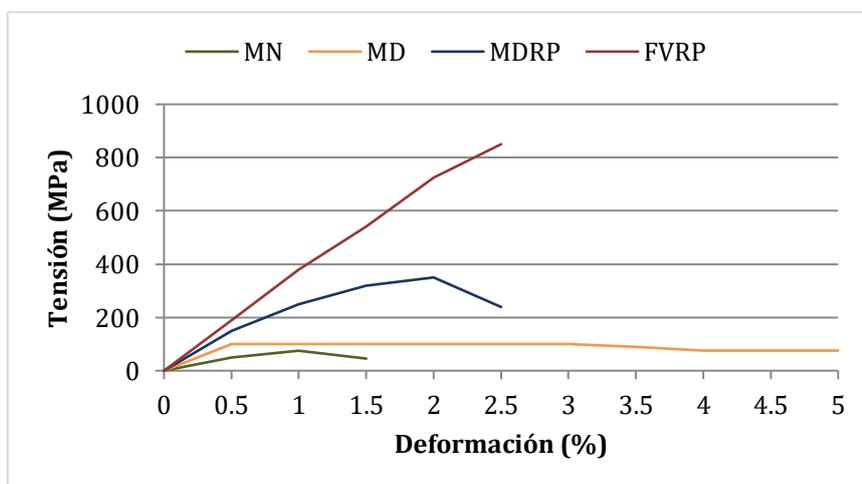


Figura 3. Curvas de tensión-deformación de tracción de madera natural (MN), madera deslignificada (MD), madera deslignificada reforzada con polímeros(MDRP) y fibra de vidrio reforzada con polímeros (FVRP).

## **2.4. Fabricación y diseño de compuestos de alto rendimiento a base de madera (Marion Frey et al., 2019)**

La madera densificada deslignificada es un nuevo material prometedor y sostenible que posee el potencial de reemplazar a los materiales sintéticos, como los compuestos reforzados con fibra de vidrio, debido a sus excelentes propiedades mecánicas.

La madera deslignificada, sin embargo, es bastante frágil en estado húmedo lo que dificulta su manejo y modelado. La madera deslignificada retiene la estructura, que se transfiere al nuevo material. La densificación directa de muestras de madera deslignificadas saturadas de agua produce un grado de densificación limitado, grietas y distorsiones debido al agua libre en el material final. Para evitar la pérdida de la integridad estructural tras la densificación, las soluciones actuales incluyen la utilización de una deslignificación parcial seguida de una densificación a alta temperatura o pre-secar la madera deslignificada antes de la densificación. Ambos métodos mejoran la conectividad entre las células vecinas ya sea debido a que la lignina remanente actúa como pegamento o por la eliminación del agua libre entre células. En ambos casos se produce una conformabilidad reducida, lo que limita las aplicaciones de diseño. Es necesario un proceso escalable y rápido que combine moldeado y densificación en un solo paso.

Frey y colaboradores presentan en este estudio dos procesos de fabricación, densificación en molde cerrado y densificación al vacío, para producir compuestos de celulosa de alto rendimiento a base de madera deslignificada. La densificación en molde cerrado tiene la ventaja de que no se necesita ningún equipo de laboratorio sofisticado. Se pueden usar abrazaderas de tornillo simples o una prensa para densificar. Recomiendan este método para piezas pequeñas con geometrías simples y grandes radios de curvatura. La densificación al vacío en un proceso de molde abierto es adecuada para objetos más grandes y geometrías más complejas, incluidos pequeños radios de curvatura.

Se presenta un proceso de deslignificación y densificación que combina moldeado, densificación y secado en un método simple y escalable:

### **1. Delignificación**

- 1.1 Se preparan muestras de láminas de píceas con corte radial de 1,5mm de espesor (las especies de madera, los tipos de corte o los espesores pueden variar).
- 1.2 Se monta un sujetador de muestras de acero inoxidable en un recipiente de cristal y se coloca una barra de imán debajo del mismo.
- 1.3 Se van amontonando las muestras de madera sobre el sujetador separadas por mallas metálicas.
- 1.4 Se prepara una mezcla 1:1 de volumen de peróxido de hidrógeno (30 wt%) y ácido acético glacial y se vierte en el recipiente de cristal hasta que las muestras están completamente cubiertas. Se dejan las muestras en remojo a temperatura ambiente durante una noche mientras se remueve la mezcla a 150 rpm.

- 1.5 Se calienta la mezcla a 80°C durante 6 h para una deslignificación total.
- 1.6 Después de la deslignificación, se vierte la mezcla en un matraz y se deja enfriar antes de su eliminación.
- 1.7 Se enjuagan las muestras varias veces en agua desionizada. Para ello se llena el recipiente con agua desionizada varias veces sin remover. Se cambia el agua dos veces al día hasta que el pH del agua de lavado alcanza un valor por encima de 5.
- 1.8 Las láminas de madera deslignificadas húmedas se manejan sobre las mallas metálicas para preservar sus estructuras de celulosa ya que son muy frágiles.

## 2. Almacenamiento

- 2.1 Para almacenar las láminas, éstas se secan entre mallas de metal en el horno.
- 2.2 Se guardan las láminas secas a 65% de humedad relativa. Se deben humedecer en agua antes de su posterior procesamiento.

## 3. Densificación en moldes cerrados

- 3.1 Se usan moldes cerrados fabricados en material poroso (cerámica, moldes de polímero impresos en 3D porosos) que permitan el paso del agua sobrante y el secado. El tamaño de los poros debería estar por debajo de los 2 mm especialmente hacia la superficie para obtener una muestra resultante con una superficie lisa.
- 3.2 Para estructuras planas se usan muestras a 95% de humedad relativa a 20°C. Para radios de curvatura más pequeños, se usan muestras completamente húmedas para acomodarlas a la forma del molde y se pre-secan en horno a 65°C durante 5 a 30 min, dependiendo del espesor de la muestra, para eliminar el agua sobrante.
- 3.3 Se cierra el molde y se densifica el material mediante prensado o abrazaderas con bajas presiones de pocos MPa. Se puede acelerar el proceso colocando el molde en el horno a 65°C.
- 3.4 Una vez secado completamente, se desmolda la pieza densificada.

## 4. Densificación en moldes abiertos

- 4.1 Se usan moldes abiertos porosos. Alternativamente pueden usarse moldes no porosos con una capa porosa (telas, mallas) en la parte alta del molde para permitir el secado.
- 4.2 Se coloca una capa textil para proteger el molde de contaminación. Se acomoda la muestra completamente húmeda encima de la capa textil y se cubre con una segunda capa y una malla flexible.
- 4.3 Se coloca el molde sobre un plato de acero inoxidable, se coloca un adhesivo de sellado en los bordes del plato, un tubo de vacío y se envuelve toda la muestra con una bolsa de vacío.
- 4.4 Se aplica el vacío para el secado y, simultáneamente, densificación de la muestra. Para acelerar el proceso, se coloca todo el set en el horno a temperatura elevada, 65°C. El rango de presión es de 10(-2) bar.
- 4.5 Después del secado se desmolda la muestra.

## 5. Elaboración de muestras laminadas

5.1 Se fabrica una pieza multicapa más gruesa compuesta por varias láminas con diferentes ángulos de orientación de las capas.

5.2 El tiempo de vacío depende del tamaño y espesor de la pieza: desde 2 h para una sola capa hasta 2 días para 8 capas.

5.3 Para incrementar el pegado entre capas de madera deslignificada, se aplica un adhesivo entre capas durante el proceso de moldeado. Se usa adhesivo con base acuosa que permite el secado del adhesivo.

5.4 Se desmolda la pieza.

La madera deslignificada que es densificada hasta alrededor de un cuarto de su espesor inicial, alcanza valores del módulo de elasticidad de alrededor de 25 GPa y valores de resistencia en el rango de 150-180 MPa. Con el proceso de vacío se alcanza una densificación de un cuarto del espesor inicial de la muestra y esto corresponde a un CVF de 66% (Tabla 1 y Figura 1).

CVF	20%	33%	50%	66%	85%
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,3	0,5	0,72	1	1,3
Módulo elástico de tracción (Gpa)	5	10	15	25	35
Resistencia a la tracción (Mpa)	60	90	120	180	250

Tabla 1. Valores de módulo elástico a tracción y resistencia a la tracción de madera deslignificada y densificada.

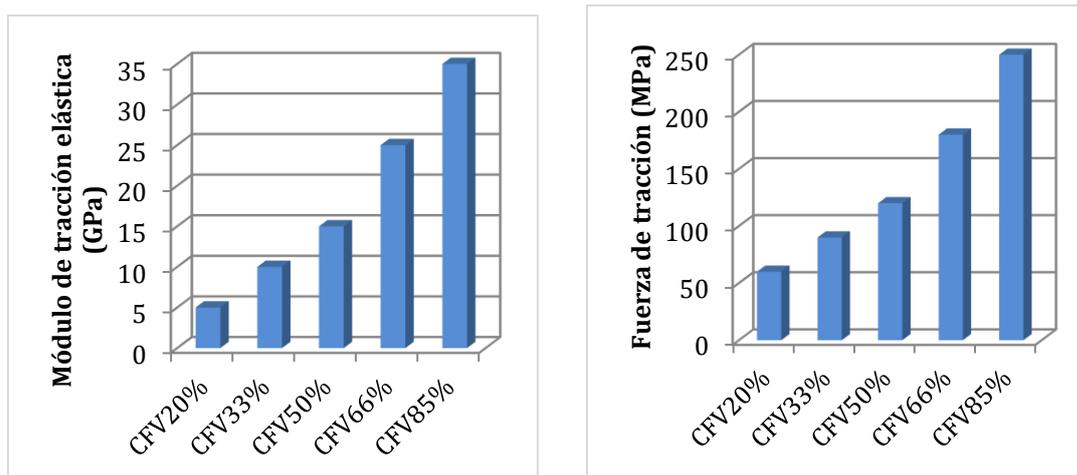


Figura 1. Valores de módulo elástico a tracción y resistencia a la tracción de madera deslignificada y densificada.

El proceso de vacío de la madera deslignificada tiene el potencial de convertirse en una producción fácil y rápida a gran escala de un compuesto de fibras de celulosa densificada. Para una mayor durabilidad del material, pueden añadirse revestimientos de materiales apropiados, pegamentos solubles al agua o modificaciones químicas que posibilitan la aplicación industrial del material, como componentes de la industria automovilística (paneles de puertas, suelos, salpicaderos). Este material podría reemplazar metales o compuestos reforzados con fibras para reducir el peso. Y además mejorando su reciclabilidad.

## 3. El material de micelio

### **3.1. La formación del biocompuesto**

El micelio es el aparato vegetativo de los hongos que le sirve para nutrirse y que está bajo tierra. El micelio crece por una relación simbiótica con los materiales que lo alimentan, formando redes enmarañadas en tres dimensiones de fibras ramificadas. Los filamentos del micelio se llaman hifas y consisten en células alargadas. Estas células se separan unas de otras por unos cruces internos porosos llamados septos. La pared de estas células juega varios papeles fisiológicos en la morfogénesis del hongo: protegiendo la hifa y proveyendo de la fuerza mecánica a todo el micelio. Esta pared se compone de quitina, glucanos y una capa de proteínas (Haneef et al., 2017).

El micelio penetra en los sustratos que le alimentan por presión física y por secreción de enzimas para descomponer los polímeros del sustrato en nutrientes más fácilmente absorbidos y transportados, como los azúcares (algunas de las enzimas que excretan son capaces de degradar los componentes de las plantas más difíciles de hidrolizar, como la lignina) (Haneef et al., 2017). Con el tiempo, el sustrato se reemplaza parcialmente por la biomasa del hongo, el micelio resultante es capaz de consolidar fuertemente el sustrato por sí mismo, resultando un biocompuesto (Girometta et al., 2019).

En un cierto momento, la hifa crece fuera del sustrato en el aire creando una capa compacta que cubre el sustrato. Esta capa se conoce como la piel del hongo. Se distinguen dos tipos de material: el puro y el compuesto. El material puro es el resultado de la degradación completa del sustrato y se obtiene extrayendo la piel del hongo del sustrato (Appels et al., 2019)

Las propiedades de los materiales de micelio dependen del sustrato, del tipo de hongo, de las condiciones de crecimiento y del procesamiento posterior.

### **3.2. El proceso de cultivo del material de micelio**

En general, el proceso para fabricar un material de micelio consiste básicamente en seis pasos según (Lelivelt et al., 2015).

El primer paso es la creación del hábitat para el hongo: el sustrato. El sustrato puede ser cualquier material rico en celulosa como la paja, madera, serrín o cáñamo. El sustrato necesita tener un contenido alto en celulosa por dos razones: el hongo puede descomponer la celulosa en glucosa por lo tanto, en ambientes ricos en celulosa, el hongo puede crecer rápidamente, mientras que otros organismos no son capaces de hacer esto. La segunda razón es que muchas fibras naturales y maderas son un compuesto de celulosa rígida y fuerte embebida en una matriz de lignina. Por lo tanto, contenidos altos en celulosa predicen alta fuerza de tracción. Como el sustrato actuará como refuerzo del material, una fuerza de tracción alta predice un comportamiento mecánico alto en el material final.

Una vez seleccionado y mezclado, el sustrato se esteriliza para prevenir la infección por otros organismos durante el crecimiento del micelio. Este proceso puede hacerse hirviendo el sustrato en agua o tratándolo con peróxido de hidrógeno.

Después de la esterilización, se inocula el sustrato con las esporas del hongo. Para ello, se mezcla el sustrato con las esporas.

Después de la inoculación, el hongo coloniza el sustrato creciendo a través de él. Las condiciones para que este crecimiento se produzca de la forma más homogénea posible son oscuridad, contenido de humedad muy alto (90-100% humedad relativa) y aire. La oscuridad es necesaria porque la presencia de luz indica al hongo que ya está en la superficie, entonces empieza a producir frutos (setas). Se requiere aire fresco porque el micelio necesita oxígeno durante su crecimiento. La temperatura óptima depende del tipo de hongo pero en general no debería estar por encima de los 40°C ya que el hongo produce calor durante el crecimiento.

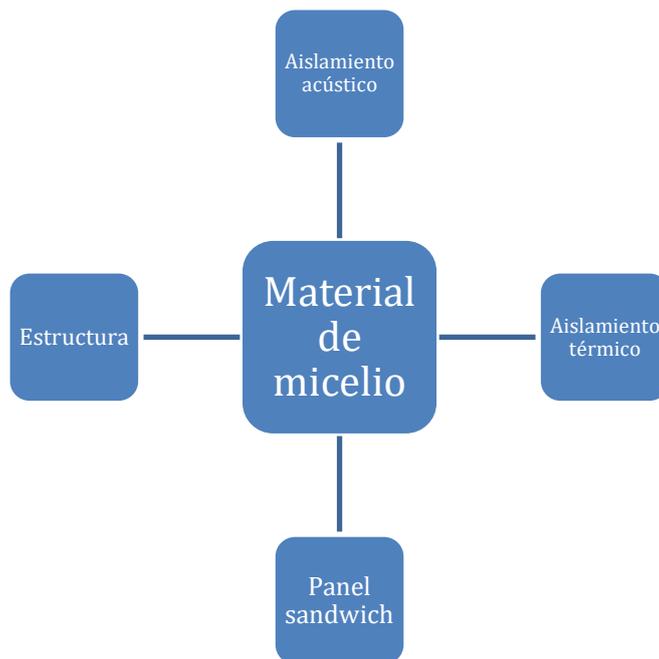
Tras la fase de colonización, el crecimiento se interrumpe por secado y/o calentamiento del material. Por secado, el hongo se preserva en un estado de hibernación permitiéndole reiniciar el crecimiento cuando las condiciones de humedad sean de nuevo favorables. El calentamiento, sin embargo, mata al hongo (Appels et al., 2019).

Tras el secado o calentamiento, el material puede ser desmoldado y revestido o tratado en su superficie para mejorar algunas propiedades.



El material de micelio resultante es completamente natural y biodegradable, su producción consume baja energía y tiene un gran potencial coste-efectividad. Estas características se alinean con la economía circular donde el valor de los productos, materiales y recursos se mantienen en la economía el mayor tiempo posible y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos (Europa, 2015).

El propósito de los siguientes sub-apartados es analizar la posible sustitución de materiales utilizados hoy en día por material de micelio en base a las distintas propiedades del mismo descritas por la investigación.



### 3.3.- Análisis de los materiales de micelio y propiedades

#### 3.3.1.- Material de micelio como aislamiento térmico

El aislamiento térmico de los edificios juega un papel importante en la mejora del confort térmico, salud y bienestar de los ocupantes, en la reducción de consumos de energía para el calentamiento o enfriamiento de los mismos, así como en las emisiones de carbono y polución (Xing, Brewer, El-Gharabawy, Griffith, & Jones, 2018).

Poliestirenos y poliuretanos normalmente se usan como aislamientos térmicos y rellenos ligeros en construcción de infraestructuras y edificación. Estos materiales con base de hidrocarburo son ligeros, hidrófobos y resistentes a fotólisis. Sin embargo, estos materiales no son renovables y su producción y uso implican procesos complejos de manufacturación, aportes de energía sustanciales y residuos asociados. Además liberan toxinas que se acumulan en la fauna marina y vida salvaje presentando un problema para la salud pública y ambiental (Yang, Zhang, Still, White, & Amstislavski, 2017).

En diversos estudios se muestra que el material de micelio exhibe propiedades similares al poliestireno expandido u otras espumas permitiendo su uso como material de aislamiento.

(Yang et al., 2017) realizaron un estudio en el que analizaba las propiedades de una bioespuma con base de micelio. Obtuvo muestras con tres protocolos diferentes con distintos materiales de sustrato y dos condiciones de almacenaje.

Protocolo I: el sustrato y hongo se mezclaban y almacenaban en moldes que se colocaban a temperatura y humedad controlada en incubadora.

Protocolo II: El sustrato y el hongo se incubaban en bolsas de polipropileno con filtro durante un tiempo y después de trasladaban a los moldes.

Protocolo III: el protocolo I pero añadiendo fibra natural (50% del peso seco del sustrato) durante la mezcla.

La forma de almacenaje de la mezcla se aplicó de dos formas: suelto y denso, en el primer caso se depositaba la mezcla naturalmente sin compactación, en el segundo se compactaba aproximadamente dos veces el volumen de la mezcla almacenada.

El hongo inoculado pertenecía a los Basidiomycete saprotrophic: *L. Lacteus*, y los sustratos se componían de pulpa de serrín de abedul de 5 mm tamaño o menos, grano de mijo, salvado de trigo, fibra natural y sulfato de calcio. Se cultivaron durante 2 o 6 semanas, dependiendo de la muestra y, unas se secaron en horno a 60°C durante 24 horas y otras mantuvieron vivas.

Con las muestras obtenidas realizaron ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas de las mismas: densidad seca, conductividad térmica, módulo elástico incluyendo modulo de Young y módulo cortante, ratio de Poisson y fuerza de compresión.

En base a los resultados obtenidos concluyeron que:

1. El material de micelio es más ligero que otros materiales usados en la industria de la construcción.
2. Las muestras compactadas al colocarlas en los moldes mostraban las densidades secas, módulos elásticos y fuerzas de compresión más altas.
3. El material seco demostraba buena conductividad térmica en el rango de 0,05-0,07 w/mK.
4. Las muestras secas muestran un buen módulo de elasticidad, las muestras vivas mucho más bajo.
5. El material muestra una fuerte anisotropía elástica con modulo de Young y cortante en la dirección horizontal de 20-60% mayor que los de la dirección vertical.
6. El material mostraba excelente fuerza de compresión con una media de 350-570 kPa.
7. El tiempo de cultivo no influye en la densidad seca y conductividad térmica, tiene un impacto negativo en el modulo elástico y positivo en la fuerza de compresión.
8. La adición de fibras naturales ayuda a mejorar el modulo elástico y la fuerza de compresión.
9. Este material tiene las mismas o excede las características de las espumas poliméricas térmicas convencionales excepto la densidad seca.

Para conocer otras características de este material como el comportamiento frente al agua o la resistencia al fuego, tal y como indica (Yang et al., 2017) al final de su estudio, se revisan diferentes estudios.

(Haneef et al., 2017) en su estudio para conocer las propiedades físicas de los materiales de micelio concluye que todos los materiales analizados son bastante resilientes a la humedad, absorbiendo bajas cantidades de agua:

50% humedad relativa: absorción <4% independientemente del sustrato y la semilla.

85% humedad relativa: absorción 6% sin diferencias entre sustratos y semillas.

100% humedad relativa: *P. Ostreatus* en sustrato de celulosa-PDB presenta mayor absorción 20% frente al 12-13% del resto de las muestras.

Respecto a la caracterización termomecánica concluye que no hay diferencias significativas entre las diferentes muestras con una única degradación térmica que empieza a los 225°C y termina cerca de los 300°C. Esta alta temperatura de degradación prueba que son materiales térmicamente estables, lo que expande su campo de aplicación.

En este caso, el análisis se realizó con muestras de *G. Lucidum* y *P. Ostreatus* en sustratos de celulosa pura y mezcla de celulosa con caldo de dextrosa de patata. Los sustratos se prepararon en laboratorio con el siguiente procedimiento: los sustratos se disuelven en TFA al 0,5 wt.% en probetas de vidrio de 60mL. Las probetas se sellan con parafilm y se colocan en un agitador de laboratorio durante 3 días formando una solución viscosa. Después, las soluciones obtenidas se reparten en placas de Petri y se guardan en una campana de extracción hasta la completa evaporación del disolvente (3-4 días). Se refieren estos dos tipos de sustratos como celulosa pura y celulosa-PDB.

El procedimiento de cultivo de las muestras utilizado fue el siguiente:

- 1.- Todos los materiales y sustratos se esterilizan en autoclave a 120°C durante 15 minutos.
- 2.- Se inocula los dos tipos de micelio en los diferentes sustratos.
- 3.- Un volumen de 5uL de PDB se vierte en el sustrato cuando se inocula de micelio para facilitar el crecimiento inicial.
- 4.- Se incuban las muestras a 25-30°C y 70-80% HR durante 20 días en una cámara.
- 5.- El material obtenido se coloca en un horno a 60°C durante 2 h para inhibir el crecimiento.

(Appels et al., 2019) en su estudio para comprobar si los factores de fabricación influían en las propiedades mecánicas y las relacionadas con la resistencia a la humedad y al agua de los materiales de micelio, concluye que el análisis estadístico muestra que no hay un incremento general de peso excepto en dos muestras específicas al 80% HR. Sin embargo, la tendencia observada es que todos los materiales de micelio ganan la mayoría del peso en las primeras 2 horas de exposición a la humedad alcanzando la saturación en aproximadamente 12 horas. El tiempo de saturación y el peso general incrementado del material de micelio fue mayor en las muestras expuestas a 80% HR que las expuestas a 60% HR. El peso final incrementado a 40°C de las muestras a 60% HR varía entre 3,15-8,22% y entre 7,57-11,83% las expuestas a 80% HR. En general, las muestras con sustrato de algodón muestran un menor incremento de peso final comparado con los sustratos de paja de colza y serrín de haya.

Respecto a la absorción de agua al colocar las muestras sobre agua, concluye que colocar los materiales encima del agua dio como resultado un incremento del peso para todas las muestras. No se encontró relación entre la absorción de agua y el tipo de hongo, sustrato o condiciones de presión usadas.

Este trabajo se realizó con *Trametes multicolor* y *P. Ostreatus* en tres diferentes sustratos: serrín de haya suplementado con salvado, 65-70% humedad final, paja de colza suplementado con salvado, 65-70% humedad final y fibra de algodón de baja calidad no tejida, 55% humedad final. Después del crecimiento del micelio, unas muestras se presionaron en caliente (150°C), otras en frío (20°C), ambas durante 20 min y  $F < 30$  kN, y otras no se presionaron dejándolas secar en condiciones ambientales durante 24-48 h. Todas las muestras se secaron a 80°C durante 24 h antes de los ensayos.

Otro estudio que analiza el comportamiento del material de micelio frente al fuego es el de (Jones et al., 2018). De acuerdo con este estudio, el material de micelio mostraba un tiempo de ignición que es similar en comparación con la espuma de poliestireno extruida aunque significativamente más corto que el de los aglomerados. La temperatura de ignición estaba en el rango de entre 200 y 400°C, aunque el micelio no mostraba propiedades intrínsecas ignífugas sino que sólo actuaba como un cemento. Esto era debido a la pasivación que ocurre en el micelio cuando sus capas superficiales de quemar, estas capas quemadas evitan el contacto del oxígeno con el material lo que restringe la combustión del micelio.

El ratio de desprendimiento de calor (HRR) es particularmente importante para modelizar el crecimiento y expansión del fuego. Tanto (Holt et al., 2012) como (Jones et al., 2018) reportaron valores similares para los materiales de micelio, en unos valores medios de HRR de 55-75 y 33-107 kW/m<sup>2</sup> respectivamente y picos de HRR de 66-116 y 79-185 kW/m<sup>2</sup> respectivamente. Esto significa que el pico ocurría en el primer minuto después de la ignición. (Jones et al., 2018) también informó que los valores más altos de HRR se producen cuando se incrementaba la fracción de grano en el sustrato, debido a su poder calorífico.

El estudio de (Jones et al., 2018) se realizó con sustratos de cáscaras de arroz y granos de trigo empapados 48 h en agua ultrapura y esterilizados a 121°C y 103,4 kPa durante 40 minutos antes de su uso. Los sustratos y aditivos se combinaron en distintos ratios con *Trametes versicolor*. El sustrato inoculado se depositó en moldes de plástico sellados e incubados bajo unas condiciones ambientales de 25°C y 50% HR durante 12 días. Tras este periodo, las muestras se secaron a 50°C durante 48 horas para quitar completamente la humedad absorbida y desnaturalizar el material de micelio.

Como resumen y en correlación con los estudios revisados, los materiales de micelio tendrían la media más baja de HRR y un tiempo de combustión súbita más largo que los materiales sintéticos de la construcción. También liberarían menos humo y CO<sub>2</sub>.

A la vista de los resultados de los trabajos anteriores, se puede concluir que el material de micelio tiene un buen potencial como aislante térmico en comparación con la amplia variedad de materiales comerciales comúnmente usados en ingeniería. Tiene propiedades mecánicas adecuadas, se comporta bien frente a la humedad y frente al fuego y tiene una conductividad térmica baja.

Algunas empresas comercializan paneles de aislamiento acústico realizados con micelio. Es el caso de Ecovative (USA) con su panel MycoFoam certificado con el sello Cradle to Cradle cuyas características técnicas son las siguientes:

	Standard	Laboratorio de ensayo	MycoFoam
Densidad (lbs/ft3)	ASTM C303	Ecotative	7,6
Fuerza de compresión (psi)	ASTM C165	Ecotative	18
Módulo elástico de compresión (psi)	ASTM C165	Ecotative	165
Fuerza de flexión (psi)	ASTM C203	Ecotative	34
Compostabilidad (días)	ASTM D6400	NSF International	30
Propagación del fuego	ASTM E84	QAI	20
Emisiones de humo	ASTM E84	QAI	50
Conductividad térmica a 10°C (W/mK)	ASTM C518	Oak Ridge National Laboratory	0,039
Impregnación de vapor de agua	ASTM E96	Oak Ridge National Laboratory	30
Retención de humedad al 53,5% HR (%)	ASTM C1498	Oak Ridge National Laboratory	8
Retención de humedad al 75% HR (%)	ASTM C1498	Oak Ridge National Laboratory	12

En Europa la empresa holandesa Grown.bio comercializa estos paneles bajo licencia de Ecovative.

En Portugal, Critical Concrete ha fabricado paneles para aislamiento térmico utilizando cartón como sustrato. El cartón es ligero, gratis y reciclable. Además de sus propiedades de aislamiento, es un conductor térmico pobre lo que le hace un material apropiado para el aislamiento térmico. Y además en un buen sustrato para el crecimiento del micelio debido a su composición muy alta en celulosa (90%).

Para la fabricación de los paneles se utilizó *P. Ostreatus* como semilla y cartón como sustrato. El proceso de cultivo es el habitual colocando el sustrato (cartón troceado) y aditivo (harina de maíz) esterilizados junto con la semilla en moldes con tapa perforada para permitir la aireación. Se cultiva durante 1 a 2 semanas en condiciones de oscuridad, 65% HR y 25°C y, por último, se seca en horno a 80°C durante 1 hora.

El material obtenido tiene propiedades similares a las revisadas previamente. Un estudio del coste de la fabricación del material de micelio con sustrato de cartón en relación a otros materiales convencionales, muestra que, a excepción de la lana de vidrio, la producción de este material tiene un menor coste, añadiendo un valor más al resto de ventajas medioambientales.

Para cada panel de 0,5 m<sup>2</sup>:

11 kg de cartón: gratis

800 grs de harina de maíz: 1,98€

1,1 kg de P. Ostratus: 5,83€

Total: 7,81€ lo que representa 15,62€/m<sup>2</sup>.

Comparando con otros tipos de aislamiento:

Tipo de aislamiento	€/m <sup>2</sup>
Lana de vidrio	11,16
Poliestireno expandido	19,58
Poliestireno extruido	24,81
Poliuretano	34,95

### 3.3.2. Material de micelio como aislamiento acústico

Además del aislamiento térmico, el material de micelio ha sido también testado como aislamiento acústico.

El estudio de (Pelletier, Holt, Wanjura, Bayer, & McIntyre, 2013), que ensayaba con paneles fabricados con diferentes sustratos, sugería la existencia de un gran rango de flexibilidad con estos materiales cuando se trata de implementar paneles de absorción acústica. Esta conclusión se apoyaba observando, que incluso los materiales con más bajos rendimientos, como el producido con un sustrato de 100% fibras de algodón, muestran más de 70-75% de absorción acústica al pico de frecuencia de 1000 Hz. Comparando espectros de audio, la absorción más alta se producía con paneles compuestos por sustrato de 50-50% de pasto varilla y sorgo.

En un estudio posterior (Pelletier et al., 2017) añadieron un paso más al proceso de obtención de material de micelio que consistía en la compresión a alta temperatura de las muestras para generar una nueva variante que resultaba mucho más densa pudiendo ser más apropiada para otras aplicaciones.

Se examinaban paneles de material fabricados con sustratos típicos a lo largo de un rango de densidades obtenidas por compresión para aumentar el conocimiento sobre la influencia de la densidad en las propiedades de protección acústica.

El proceso de cultivo era el habitual hasta la obtención de los paneles. Este proceso tenía como resultado un panel de baja densidad apropiado para distintas aplicaciones como absorbentes acústicos de bajo peso, flotadores para pesca y material para empaquetar.

Para transformar estos paneles de baja densidad en un nuevo panel de alta densidad, se requería un paso adicional en el proceso. El proceso de densificación comenzaba con el tratamiento con calor de los paneles durante 10 minutos a 100°C con diferentes presiones altas. Para obtener un rango de densidades para evaluar en este estudio, los

paneles se comprimieron a las siguientes presiones: 0, “sin compresión”, 2644, 3051, 3661, 4678 N/m<sup>2</sup> para alcanzar 5 niveles de densidades: 0,042 (sin compresión), 0,057, 0,086, 0,120, 0,169 g/cc. Ningún ligante adicional fue añadido en la obtención de estos nuevos paneles. El único ligante procede del micelio natural y el polímero quitinoso que se deposita por el crecimiento natural del hongo. Así el único paso para crear estos paneles de alta densidad fue someter a los paneles de micelio de baja densidad a alta presión y tratamiento de calor.

De los resultados de los ensayos se obtenía que, al aumentar la densidad la absorción acústica se reduce.

Por lo tanto, los paneles de micelio con densidad baja proveen una mejor absorción o equivalente a las piezas comerciales acústicas actuales, pero usando menos material. Así que, para aplicaciones donde la absorción sea lo interesante, los paneles de baja densidad de micelio pueden representar una alternativa competitiva.

Nombre de la muestra	Densidad (gm/cc)	Atenuación (dBa)
Pieza acústica comercial	0,71	7,6
MBD	0,42	7,1
MAD tratamiento 1	0,57	4,6
MAD tratamiento 2	0,86	1,3
MAD tratamiento 3	1,12	0,8
MAD tratamiento 4	1,70	0,1

Resultados de absorción acústica contra un reflector alto. Abreviación para las muestras: MBD panel de micelio de baja densidad, MAD panel de micelio de alta densidad.

Contrariamente, el dato de transmisión acústica a través del panel es justo el opuesto. Cuando se incrementaba la densidad se incrementaba la atenuación. Para protección del sonido a través de transmisión, las piezas comerciales acústicas tienen una alta correlación con los paneles de micelio de alta densidad. El incremento de la densidad tiene efecto en las propiedades acústicas de los paneles de micelio. Un punto clave que emerge en este estudio era la mejora de la protección del sonido de baja frecuencia por los paneles de micelio de alta densidad.

Nombre de la muestra	Densidad (gm/cc)	Atenuación (dBa)
Pieza acústica comercial	0,70	5,2
MBD	0,50	3,0
MAD tratamiento 1	0,68	4,5
MAD tratamiento 2	0,87	10,0
MAD tratamiento 3	1,27	15,2
MAD tratamiento 4	1,75	13,7

Resultados de absorción acústica a través de transmisión (protección al sonido). Abreviación para las muestras: MBD panel de micelio de baja densidad, MAD panel de micelio de alta densidad.

Los resultados de estos dos estudios indican que los paneles de micelio no comprimidos se muestran como una clara alternativa a las piezas comerciales acústicas de techo o pared para su uso en aplicaciones de absorción del sonido. Para protección del sonido, en aplicaciones a través de transmisión, como el tratamiento interior a las paredes o

bajo suelos, los paneles de micelio densificados proveen una alternativa a los tradicionales paneles de MDF y OSB (tableros de viruta orientada).

Por lo tanto, en comparación con los materiales tradicionales con base de petróleo, los materiales de micelio que absorben o protegen del sonido podrían ser una alternativa de bajo coste y alto rendimiento, con la ventaja añadida de ser biodegradables cuando el producto terminara su vida útil.

Varias empresas comercializan paneles acústicos fabricados con material de micelio para colocar de forma vista sobre las paredes. Ecovative (USA) y Grown.bio (Países Bajos) han utilizado las propiedades acústicas de su material MycoFoam para crear el panel *Sinewave*. Mogu (Italia) presenta una colección de paneles acústicos con formas en 3D, acabado aterciopelado para maximizar la absorción del sonido: *Wave*, *Kite*, *Fields* y *Plain*. MycoTech (Indonesia) tiene un panel denominado *Biobo* para edificios residenciales y espacios públicos.

### **3.3.3. Material de micelio como panel sándwich**

Aunque no hay mucha información en la literatura, los materiales de micelio podrían utilizarse como relleno de los paneles sándwich metálicos.

En el trabajo de tesis realizado por (Promoteur, 2019) compara un panel sándwich hecho de espuma de poliisocianurato entre dos hojas de acero galvanizado (Promisol S) y otro panel prefabricado hecho de dos hojas de acero con núcleo de lana de vidrio (Promistyl) con un panel sándwich cuyo relleno se compone de material de micelio.

Las características mecánicas de los paneles Promisol S, Promistyl y los de material de micelio alcanzan valores similares tal y como se muestra en estudios anteriores, sin embargo, la densidad y la conductividad térmica son mayores en el material de micelio. Esto significa que, para que los tres paneles sándwich tengan la misma resistencia térmica, el panel sándwich de material de micelio necesitaría un espesor mucho mayor, del orden de un incremento del 292% respecto del panel Promisol S y un 146% respecto del panel Promistyl. Esto podría repercutir en un mayor necesidad de espacio en el lugar donde fueran colocados estos paneles.

Otro posible inconveniente está relacionado con la densidad del material de micelio (380-400 kg/m<sup>3</sup> con *P. Ostreautus*). Esta densidad es del orden de 975% más alta que la del panel de Promisol S (35-45 kg/m<sup>3</sup>) y 380% más alta que la del panel Promistyl (90-115 kg/m<sup>3</sup>), por lo que el peso de los paneles sándwich de material de micelio sería significativamente superior. Incluso considerando densidades más bajas de material de micelio del orden de 50-60 kg/m<sup>3</sup> como la indicada por (Xing et al., 2018) en su estudio que utilizaba semillas de *Oxyporus latermarginatus*, *Megasporoporia minor* y *Ganoderma resinaceum*, el peso de los paneles sería todavía alto en comparación con los paneles Promisol S o Promistyl. Esto repercutiría probablemente en la estructura de soporte de estos paneles, que sería más pesada y voluminosa.

Como ventajas de los paneles sándwich de material de micelio sobre los producidos con espumas derivadas del petróleo, se podría resaltar que el material de micelio cuando arde libera CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O mientras que los otros paneles liberan isocianatos, óxido nítrico, cloruro de hidrógeno y cianuro de hidrógeno, sustancias tóxicas peligrosas. Otra ventaja importante sería que los paneles sándwich de material de micelio serían completamente biodegradables mientras que los otros paneles son generalmente transportados a vertedero al finalizar su vida útil.

### **3.3.4. Material de micelio como estructura**

Un desafío para el material de micelio es su utilización como elemento estructural. El material de micelio se considera un material “blando”, sin embargo si, mediante la geometría se consigue que el material funcione a compresión, este material “blando” sería capaz de rendir estructuralmente. Este es el trabajo que presentaron (Heisel et al., 2017) mediante un prototipo denominado MycoTree para la bienal de Seúl 2017.

MycoTree es un prototipo de estructura consistente en componentes orgánicos procedentes de basura agrícola estabilizados exclusivamente por una matriz de micelio cultivada. Su geometría ha sido diseñada usando gráficos en 3D utilizando formas que trabajan sólo a compresión para capacitar a un material débil para su uso estructural.

El tipo de tipo de semilla de micelio utilizada en el trabajo fue *Ganoderma Lucidum* (*G. lucidum*) con dos sustratos diferentes: (1) mezcla de trocitos y serrín de *Albizia Chinensis* y (2) desechos de caña de azúcar y raíces de *Manihot esculenta* (casava, yuca), sustrato específicamente desarrollado para las piezas de MycoTree. El proceso de cultivo indicado en el estudio fue el siguiente:

- 1.- Se cortan los sustratos en piezas más pequeñas.
- 2.- Se mezclan con suplementos de nutrientes.
- 3.- Se ajusta un contenido de agua del 60-65% en la mezcla del sustrato.
- 4.- Se esterilizan en autoclave a 121°C durante 30 minutos para evitar la contaminación por otros microorganismos.
- 5.- El sustrato esterilizado se inocula con las semillas de *G. lucidum*.
- 6.- Se incuban los sustratos inoculados a unas condiciones de 28°C y 80% de humedad relativa durante 8-12 días para una colonización inicial en bolsas cilíndricas con filtro.
- 7.- Los sustratos colonizados se desmenuzan y se coloca la mezcla en moldes para continuar la incubación a las mismas condiciones durante otros 6-9 días.
- 8.- Se extraen los moldes y se expone el material de micelio al aire para desarrollar una piel quitinosa.
- 9.- Se colocan las piezas en un horno ventilado a 80°C de temperatura durante 24-48 horas para reducir el contenido de humedad a menos del 10% y prevenir el crecimiento.

En el estudio se comparaban la densidad, fuerza de compresión al 5% de deformación, fuerza límite permitida para los componentes de MycoTree, y el módulo de elasticidad de las muestras con las diferentes composiciones de sustratos. Las muestras del segundo sustrato alcanzaban propiedades de material superiores.

Composición del sustrato	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Media de Módulo de elasticidad (MPa)	Media de fuerza de compresión para 5% deformación (MPa)
Serrín+trocitos	420	3,97	0,17
Caña de azúcar+raíces casava	440	22,70	0,61

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del material de micelio con diferentes composiciones de sustrato.

Según los autores, una buena geometría era esencial para garantizar el equilibrio estático de la estructura a través de la compresión, cuando se construye con materiales que tienen poca capacidad a tensión y flexión. Para ello, usaron formas poliédricas y diagramas de fuerzas para diseñar una estructura espacial eficiente trabajando a sólo a compresión. La geometría se guió por varias limitaciones: todos los nódulos estaban limitados a una valencia máxima de 4 y el ángulo entre dos elementos lineales de micelio tenía que ser mayor de 30°. La distancia de centro a centro de cualquier par de nódulos tenía que ser de al menos 40 cms y la longitud máxima de cualquier pieza lineal de micelio estaba limitada a 60 cms.

La estructura consistía en 36 piezas lineales de un máximo de 60 cms de longitud y 15 elementos nodales de material de micelio con un peso total de 182 kg. Esta estructura soportaba una cuadrícula de bambú de 134 kg a modo de tejado o forjado. Los componentes de micelio se diseñaron para soportar su peso propio más el peso de la cuadrícula de bambú trabajando a compresión; la cuadrícula trabajaba principalmente en tensión.

La sección triangular de las piezas de micelio se dimensionó para una fuerza límite de 0,1 MPa con un coeficiente de seguridad de 1,35. La estructura podría soportar una carga puntual horizontal accidental de 0,7 kN a una altura de 1,27 m desde el suelo a un nódulo simple. Sin embargo, como la estructura se diseñó en principio para soportar carga en compresión, se debía evitar cualquier carga horizontal.

Este, por ahora, único estudio publicado utilizando material de micelio como estructura portante representa una visión provocadora de cómo se puede ir más allá de los materiales de construcción habituales procedentes de la excavación hacia materiales cultivados, cómo se puede alcanzar la estabilidad a través de la geometría en lugar de a través de la resistencia, abriendo la posibilidad de utilizar materiales más débiles con seguridad y, finalmente, cómo recursos regenerativos en combinación con diseños estructurales tienen el potencial de proponer una alternativa a los materiales establecidos dirigiéndose hacia una industria de la construcción más sostenible (Heisel et al., 2017).

### 3.4. Resumen de las propiedades del material del micelio

Para finalizar el repaso por las diferentes aplicaciones del material de micelio en la industria, se presenta un resumen de los valores físicos, mecánicos y térmicos disponibles en los estudios mencionados a lo largo de este informe.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/mK)	Módulo Young (MPa)	Fuerza compresión (kPa)	Fuerza flexión (kPa)	Fuerza tracción (kPa)	Atenuación (dBa)	Estudio
0,05-0,06	0,078-0,081	-	-	-	-	-	(Xing et al., 2018)
0,07-0,22	0,10-0,18	123-675	1-72	7-26			(Holt et al., 2012)
0,10-0,39	-	2-97	-	50-870	10-240		(Appels et al., 2019)
0,3-0,55	-	-	-	-	-	44-64	(Pelletier et al., 2013)
0,42-0,75	-	-	-	-	.	0,1-7,1/3,0-13,7	(Pelletier et al., 2017)
0,19-0,59	-	-	-	-	-	-	(Jones et al., 2018)
0,16-0,28	0,05-0,40	5-50	10-600	-	-	-	(Yang et al., 2017)
0,42-0,44	-	4-23	170-610	-	-	-	(Heisel et al., 2017)
-	-	2-28	-	-	-	-	(Haneef et al., 2017)

Como puede comprobarse no se han calculado todos los valores en cada estudio sobre material de micelio. Además, estos valores son, en algunos casos, bastante discrepantes, probablemente debido a los diferentes tipos de hongos y composiciones de sustratos usados, los períodos de incubación y los tratamientos pre o post secado.

### 3.5. Conclusiones

El propósito de este apartado era analizar la posible sustitución de materiales utilizados hoy en día por material de micelio en base a las distintas propiedades del mismo encontradas por la investigación.

En línea con los resultados analizados por los diferentes estudios se puede afirmar que el material de micelio tiene propiedades similares a algunos de los materiales usados en la actualidad.

Este es el caso de las espumas de poliestireno, poliuretano y lanas minerales, todas ellas sintéticas y procedentes del petróleo, y que se utilizan principalmente como aislantes térmicos y acústicos. Para este uso el material de micelio podría ser una excelente alternativa sostenible ya que, además de su bajo gasto energético y coste de producción, es completamente biodegradable tras su vida útil.

Respecto al uso del material de micelio como elemento estructural, cabe destacar que se trata de un material “blando” cuyas propiedades mecánicas son bajas. Sin embargo, si mediante la geometría se consigue que el material funcione a compresión, este material “blando” podría rendir estructuralmente. Hay mucho campo para la investigación en este sentido.

Con la utilización del material de micelio como sustitución de, al menos, parte de los materiales constructivos actuales, la edificación podría ser una de las industrias que se adaptaría a la economía circular: un edificio que es construido con materiales orgánicos y que puede ser compostado tras su uso inicial y llegar a ser fuente para un nuevo cultivo y ciclo de construcción. Además, como el material de micelio puede producirse localmente, se reduciría enormemente la necesidad de importar y transportar materiales constructivos, y los trabajadores de las comunidades podrían entrenarse para fabricarlo e instalarlo, mejorando la economía local.

### **3.6. Otras posibles aplicaciones inexploradas: material de micelio como aligeramiento en forjados unidireccionales y bidireccionales**

El objetivo de este apartado es el análisis de la posible sustitución de la bovedilla de poliestireno expandido (EPS) por una bovedilla de material de micelio en forjados unidireccionales y bidireccionales.

#### **3.6.1. La bovedilla de poliestireno expandido (EPS)**

##### **3.6.1.1. Introducción**

La espuma de poliestireno (EPS) es un material plástico y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas pre-expandidas de poliestireno expandible. Estas perlas se someten a unas condiciones de calor y presión que hace que el gas que hay dentro de ellas se expanda llegando a conformar una espuma cuya estructura tiene un contenido de material del 2 al 10% por unidad de volumen y resto es aire.

El EPS es muy ligero, tiene una alta resistencia térmica, insensibilidad a la humedad, excelente absorción de energía ante impactos y resistencia a la compresión. En la construcción se aplica en función de estas características, principalmente como aislamiento térmico y acústico (Capilla-González, Plascencia-Mora, Torres-Cisneros, Aguilera-Cortés, & Diosdado-De la Peña, 2013).

Otro de los usos de este material en la construcción es como aligeramiento de las losas de hormigón de los forjados mediante el sistema de vigueta y bovedilla. Se utiliza la bovedilla de EPS en forjados unidireccionales o como bloque perdido en forjados bidireccionales contribuyendo a modelar la sección resistente del forjado pero de una forma más ligera que lo hacen las bovedillas cerámicas o casetones de hormigón. Esto tiene sus ventajas pero también sus inconvenientes.



<http://preglaco.com/>

##### **3.6.1.2. Ventajas e inconvenientes del uso de la bovedilla de EPS**

La principal ventaja del uso de EPS en los forjados de las estructuras es la reducción del peso propio de la misma. En general, el peso propio de un edificio representa aproximadamente el 50% de su carga total. Para reducir este peso propio, se puede hacer más liviana o menos pesada la estructura del mismo, quitándole peso o carga. El lugar donde es más necesario ese aligeramiento es en la parte horizontal de la estructura: forjados y cubiertas.

El peso depende básicamente de la densidad de los materiales utilizados. La pieza más pesada de las utilizadas en forjados es la bovedilla de hormigón con una densidad aproximada de 2.200 kg/m<sup>3</sup>. La pieza cerámica supone un aligeramiento respecto a la de hormigón con una densidad aproximada de 1.600 kg/m<sup>3</sup>. Y la pieza más ligera es la de EPS con una densidad que varía entre los 10-15 kg/m<sup>3</sup> de las bovedillas macizas o mecanizadas y los 20 kg/m<sup>3</sup> de las moldeadas o alveolares.



<https://comunidad.leroymerlin.es/>

El menor peso de las bovedillas redonda en un mejor funcionamiento de la tensiones y las deformaciones, un menor dimensionamiento de los pilares, vigas y cimentación y una reducción del acero necesario para armarlos con la consiguiente reducción de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> tanto en la fabricación del mismo como en la construcción.

Además, al tener un menor peso, el rendimiento en el montaje es mayor con un ahorro de tiempo y mano de obra, se necesitan menos elementos auxiliares (grúas y elevadores) y el almacenaje de las bovedillas puede hacerse sobre el propio forjado ya que los palets no superan los 30 kg de peso.



<https://prefabricados-lecrin.com/bovedillas-de-poliestireno-expandido/>

Otra ventaja del uso de bovedillas de EPS es el aislamiento térmico. El EPS es un material que se utiliza como aislamiento térmico en forma de paneles en la construcción, por lo

tanto un forjado con este material conseguirá aislar mejor térmicamente el edificio, siempre que no haya puentes térmicos en la instalación.

Como desventajas de usar las bovedillas de EPS en los forjados se destaca un menor aislamiento acústico. La masa es la mejor propiedad que puede tener un material para aislar acústicamente. Por eso todos los forjados aligerados tienen un peor comportamiento acústico que una losa de hormigón macizo y entre estos el que tiene menor masa es el aligerado con bovedillas de EPS, lo que hace que sean los forjados con peor comportamiento acústico. Por este motivo estas estructuras aligeradas con EPS requieren de soluciones adicionales que minimicen la transmisión acústica entre plantas, como falsos techos o pavimentos flotantes.

Este tipo de bovedilla es inflamable por lo tanto debe añadirse otro sistema que proteja a la estructura del fuego. Tampoco se pueden alojar fuentes de calor alto en el interior de las bovedillas como alumbrado eléctrico, tuberías de calefacción o luminarias que alcancen gran temperatura ya que el poliestireno expandido disipa mal el calor.

El poliestireno expandido es un material con porosidad muy baja por lo que no existe adherencia con otros revestimientos por lo que el mortero o el yeso no se adhieren a él. Esta circunstancia se puede salvar usando yesos especiales con aditivos añadidos que mejoren la adherencia química lo que hace que este revestimiento sea más caro o realizando ranuras o resaltes en la cara de la bovedilla que debe ser revestida para que la pasta tenga un mayor agarre mecánico.

Otra desventaja es que los forjados de EPS pueden absorber cargas colgadas pero con mayores dificultades que sus competidores. Este es un aspecto a tener en cuenta a la hora de colgar elementos como puede ser una lámpara. Para cargas pequeñas inferiores a 5 kg se puede colgar con la utilización de tornillos especiales. Para cargas superiores habría que utilizar medios auxiliares como los perfiles de los falsos techos o buscar los elementos más resistentes como las viguetas.

El poliestireno expandido es un derivado del petróleo por lo que tanto su producción como su precio están ligados a la evolución de este crudo, con una tendencia alcista por la disminución de su producción. Es un material no renovable cuya producción implica procesos complejos de manufacturación, aportes de energía sustanciales y residuos asociados.

Información obtenida de: <https://jordimarrot.blogspot.com/2012/06/el-poliestireno-expandido-al-que.html?m=1> y <https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Blog-de-la-Comunidad/Ventajas-e-inconvenientes-del-poliestireno-expandido-en/ba-p/233609>)

### **3.6.1.3. Normativa y características de las bovedillas de EPS**

Las normas actuales aplicables a las bovedillas de EPS son:

UNE 53976.- Plásticos. Bovedillas de poliestireno expandido para forjados unidireccionales hormigonados en obra. Abril 1998.

UNE 53981.- Plásticos. Bovedillas de poliestireno expandido para forjados unidireccionales con viguetas prefabricadas. Abril 1998.

EFHE.- Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados (Madrid, 2004). En esta norma se exige:

La carga de rotura a flexión de cualquier pieza de entrevigado debe ser mayor de 1,0 kN (según UNE 53981:98 para piezas de EPS y según UNE 67037:99 para piezas de otros materiales).

En piezas de entrevigado cerámicas, el valor medio de la expansión por humedad según UNE 67036:99 no será mayor de 0,55 mm/m, y no debe superarse en ninguna de las mediciones individuales el valor de 0,65 mm/m.

El comportamiento de reacción al fuego de las piezas alcanzará al menos la clasificación M1 según UNE 23727:90. Las bovedillas fabricadas con materiales inflamables deberán resguardarse de la exposición al fuego mediante capas protectoras eficaces.

Las piezas de entrevigado aligerantes pueden ser de cerámica, hormigón, poliestireno expandido u otros materiales suficientemente rígidos.

También se debe tener en cuenta el Código Técnico de la Edificación CTE en su DB-SE (seguridad estructural) que no impone requisitos específicos para este tipo de piezas, así como en su DB-SI (seguridad contra incendios) que, dependiendo donde se encuentre el elemento le exige unas prestaciones frente al fuego. En este caso, se exige que el forjado sea estable el tiempo suficiente para llevar a cabo una evacuación segura. Actualmente el CTE basa sus exigencias en la clasificación por Euroclases mediante ensayo UNE EN 13501-1 que divide a los productos en A, B, C, D, E ó F con subclasificaciones s (para emisión de humos) y d (para caída de gotas o partículas inflamadas).

Los requisitos de reacción a fuego son de elementos constructivos en su conjunto, para ello se deben valorar las clasificaciones de los forjados con sus revestimientos, por lo tanto para los productos que forman una capa contenida en el elemento constructivo se exige definición *en condiciones finales de uso*.

Según este requerimiento, aunque las bovedillas de EPS tienen una clasificación de Euroclase E, estas bovedillas con una capa de mortero o yeso de 9,5 mm cumplirían la exigencia de clasificación B-s1-d0 según UNE EN 13501-1 para forjados, y rebasarían la de revestimientos, paredes, techos, aislamientos y conductos para los que se pide un B-s3-d0 (Palma, 2014).

Se presenta a continuación una tabla con características técnicas de bovedillas de EPS que comercializan algunos proveedores en España a modo de ejemplo:

	Grupo Valero	San Juan	CP5 S.A.
Densidad	Hasta 30 kg/m <sup>3</sup>	9-20 kg/m <sup>3</sup>	-
Conductividad térmica	< 0,046 W/mK	0,036-0,047 W/mK	0,030 kcal/mh°C

Reacción al fuego	M1 (UNE-EN 23727) E (UNE-EN ISO 11925-2)	E (EN 13501 – 1)	M1 (UNE 23727-90)
Resistencia a flexión	> 50 kPa	> 1,3-1,5 kN	1,97 kN

Tabla 1. Especificaciones técnicas de bovedillas de EPS de (Paneles & Casetones, n.d.), (Modelo, Juan, & Vigueta, 2014), (S.A., n.d.)

### 3.6.2. La bovedilla de material de micelio

#### 3.6.2.1 Introducción

El material de micelio es un biocompuesto que se obtiene por el rápido crecimiento de una matriz a partir del aparato vegetativo de un hongo que digiere el sustrato que lo alimenta y actúa como un cemento natural dando como resultado un material estructuralmente adecuado.

Como se ha visto apartados anteriores, en diversos estudios se muestra que el material de micelio exhibe propiedades similares al poliestireno expandido u otras espumas permitiendo su uso como material de aislamiento.

En los siguientes sub-apartados se trata de revisar y comparar, en función de las características de ambos materiales, si el material de micelio podría ser un sustituto más sostenible a las bovedillas de EPS.

#### 3.6.2.2. Características del material de micelio

Para que el material de micelio pueda utilizarse como material aligerante de los forjados unidireccionales debería cumplir con las exigencias marcadas para estos materiales por la norma EFHE y CTE que se han indicado más arriba y se resumen en: debe ser un material suficientemente rígido, la carga de rotura a flexión debe ser mayor de 1,0 kN, y el comportamiento de reacción al fuego de las piezas alcanzará al menos la clasificación M1 (según UNE 23727:90) y B-s1-d0 del elemento constructivo del forjado (según UNE EN 13501-1).

Se analizará en primer lugar si el micelio cumple con estas características revisando los trabajos existentes en la literatura y, a continuación, se examinarán las ventajas y desventajas respecto a las bovedillas de EPS.

La primera de las exigencias de la norma es que el material debe ser lo suficientemente rígido. El micelio cumpliría con esta exigencia puesto que su densidad es superior a la del poliestireno expandido aunque muy inferior a las del hormigón o las piezas cerámicas, por lo que podría considerarse un material ligero.

La densidad del material de micelio depende del tipo de hongo utilizado, del sustrato en el que tiene lugar el crecimiento, los periodos y condiciones de incubación y los tratamientos pre y post secado.

El estudio de (Appels et al., 2019) se realizó con semillas de *Trametes multicolor* y *P.Ostreatus* en tres sustratos diferentes: serrín de haya suplementado con salvado, 65-

70% humedad final, paja de colza suplementado con salvado, 65-70% humedad final y fibra de algodón de baja calidad no tejida, 55% humedad final. Después del crecimiento del micelio, unas muestras se presionaron en caliente (150°C), otras en frío (20°C), ambas durante 20 min y  $F < 30$  kN, y otras no se presionaron dejándolas secar en condiciones ambientales durante 24-48 h. Todas las muestras se secaron a 80°C durante 24 h antes de los ensayos. En la Tabla 2 se muestran las densidades obtenidas en las distintas muestras analizadas en el estudio.

Tipo de material	Hongo	Sustrato	Presión	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
TPN	T. multicolor	Paja de colza	No presión	<b>100</b>
TSN	T. multicolor	Serrín de haya	No presión	<b>170</b>
TPC	T. multicolor	Paja de colza	Presión en caliente	<b>350</b>
PPN	P. Ostreatus	Paja de colza	No presión	<b>130</b>
PPF	P. Ostreatus	Paja de colza	Presión en frío	<b>240</b>
PPC	P. Ostreatus	Paja de colza	Presión en caliente	<b>390</b>
PAN	P. Ostreatus	Algodón	No presión	<b>130</b>
PAF	P. Ostreatus	Algodón	Presión en frío	<b>240</b>
PAC	P. Ostreatus	Algodón	Presión caliente	<b>350</b>

Tabla 2. Densidades (kg/m<sup>3</sup>) de las distintas muestras analizadas en el estudio.

En el estudio de (Yang et al., 2017) el hongo inoculado era *L. lacteus* y los materiales de sustrato: pulpa de serrín de abedul de 5 mm tamaño o menos, grano de mijo, salvado de trigo, fibra natural y sulfato de calcio. Se utilizaron tres protocolos diferentes con distintos materiales de sustrato y dos condiciones de almacenamiento: el material suelto depositando la mezcla naturalmente sin compactación y, el material denso en el que se compactaba la mezcla al depositarla en los moldes aproximadamente dos veces el volumen de la mezcla. Se cultivaron durante 2 o 6 semanas, dependiendo de la muestra y, unas se secaron en horno a 60°C durante 24 horas y otras mantuvieron vivas.

Las densidades que obtuvieron para las muestras empaquetadas más densamente estaban en el rango de 230-280 kg/m<sup>3</sup> dependiendo del protocolo. La media de la densidad de las muestras empaquetadas de forma suelta estaba en el rango de 160-280 kg/m<sup>3</sup> en función del protocolo usado.

En el estudio de (Xing et al., 2018) se encuentran las densidades más bajas para el material de micelio. Este estudio utilizaba semillas de *Oxyporus latermarginatus*, *Megasporoporia* menor y *Ganoderma resinaceum* en sustratos de 20 grs de paja de trigo de 3-4 cms de longitud con 40 ml de agua. Se incubaban a 28°C durante 8 semanas y, tras el desmoldeo, se secaban a 70°C. En la Tabla 3 se muestran las densidades obtenidas en las distintas muestras analizadas en el estudio.

Especie de hongo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Oxyporus</i>	<b>51</b>
<i>Megasporoporia</i>	<b>62</b>
<i>Ganoderma resinaceum</i>	<b>57</b>

Tabla 3. Densidades (kg/m<sup>3</sup>) de las distintas muestras analizadas en el estudio.

Como puede comprobarse a la vista de los estudios mencionados, la densidad del material de micelio varía mucho moviéndose en general en un rango que va desde los 50 kg/m<sup>3</sup> hasta los 400 kg/m<sup>3</sup> o incluso densidades mayores de hasta 750 kg/m<sup>3</sup> si se densifica el material sometiéndolo a altas presiones y tratamiento de calor como se indica en el estudio de (Pelletier et al., 2017).

A pesar de este amplio rango de valores de su densidad, el material de micelio se puede considerar suficientemente rígido para su uso como aligeramiento de forjados; conservando la ventaja del poliestireno expandido de ser un material mucho más ligero frente al hormigón (2.200 kg/m<sup>3</sup>) y al material cerámico (1.600 kg/m<sup>3</sup>).

La segunda exigencia para los materiales a utilizar como entrevigado en los forjados es que la carga de rotura a flexión debe ser mayor de 1,0 kN.

El estudio de (Appels et al., 2019) mencionado anteriormente realizó ensayos de comportamiento a flexión en tres puntos con las muestras de material de micelio con máquina universal Zwick/Roell Z010 usando una velocidad de 2 mm/min y distancias de soporte de 8 mm. Los resultados que obtuvieron se muestran en la Tabla 4.

Tipo de material	Hongo	Sustrato	Presión	Resistencia a flexión (MPa)
TPN	T. multicolor	Paja de colza	No presión	<b>0,22</b>
TSN	T. multicolor	Serrín de haya	No presión	<b>0,29</b>
TPC	T. multicolor	Paja de colza	Presión en caliente	<b>0,86</b>
PPN	P. Ostreatus	Paja de colza	No presión	<b>0,06</b>
PPF	P. Ostreatus	Paja de colza	Presión en frío	<b>0,21</b>
PPC	P. Ostreatus	Paja de colza	Presión en caliente	<b>0,87</b>
PAN	P. Ostreatus	Algodón	No presión	<b>0,05</b>
PAF	P. Ostreatus	Algodón	Presión en frío	<b>0,24</b>
PAC	P. Ostreatus	Algodón	Presión caliente	<b>0,62</b>

Tabla 4. Resistencias a flexión (MPa) obtenidas de las distintas muestras analizadas en el estudio.

Los resultados muestran que la resistencia a flexión va aumentando desde las muestras sin presión, a las muestras con presión en frío y a las muestras con presión en caliente. Las muestras que alcanzan valores más bajos son las muestras sin presión que presentan resistencias a flexión que varían entre 0,05 a 0,29 MPa.

Las bovedillas comercializadas por el Grupo Valero presentan, según su ficha técnica (ver tabla 1), una resistencia a flexión superior a 50 kPa, valores que están en línea con los alcanzados por las muestras de material de micelio en el estudio anterior, incluso en el caso más desfavorable de muestras sin presión.

En las especificaciones técnicas del material de micelio MycoFoam comercializado por Ecovative como material de aislamiento se presenta:

Resistencia a flexión (psi)	ASTM C203	Ecovative	34
-----------------------------	-----------	-----------	----

Lo que equivale a una resistencia a flexión de 234,42 kPa, cumpliendo la exigencia de la norma EFHE.

En las especificaciones técnicas del material de micelio de la colección acústica comercializada por Mogu se presenta:

Resistencia a flexión (MPa)	Mogu	0,05
-----------------------------	------	------

La tercera exigencia de la norma es que el valor medio de la expansión por humedad no será mayor de 0,55 mm/m en las piezas de entrevigado **cerámicas**. Si bien, los otros tipos de piezas de entrevigado no tienen ninguna exigencia respecto a su comportamiento frente a la humedad en la EFHE, se presentan a continuación los resultados encontrados por los diferentes estudios sobre el comportamiento del material de micelio frente a la humedad por si pudieran ser procedentes.

De nuevo en el estudio de (Appels et al., 2019) se testaron 5 muestras para determinar la absorción de agua a 40°C y humedad relativa de 60% y 80%.

Se colocaron las muestras en la cámara de humedad a las condiciones seleccionadas y se midió el peso de las muestras cada 10 min en la primera hora y después de 2, 4, 24, 48, 96 y 192 h. El espesor de las muestras se midió al comenzar el experimento y después de 4 y 192 h para registrar la expansión de volumen.

El análisis estadístico muestra que no hay un incremento general de peso excepto PPF y PPC al 80% HR. Sin embargo, la tendencia observada es que todos los materiales de micelio ganan la mayoría del peso en las primeras 2 horas de exposición a la humedad alcanzando la saturación en aproximadamente 12 horas. El tiempo de saturación y el peso general incrementado del material de micelio fue mayor en las muestras expuestas a 80% HR que las expuestas a 60% HR. El peso final incrementado a 40°C de las muestras a 60% HR varía entre 3,15-8,22% y entre 7,57-11,83% las expuestas a 80% HR. En general, las muestras con sustrato de algodón muestran un menor incremento de peso final comparado con los sustratos de paja de colza y serrín de haya.

Respecto al incremento del espesor, TPC y PPC mostraron un incremento del espesor al 80% HR pero no al 60% HR. Contrariamente, el espesor de PPN, PAF y PPF se incrementó al 60% HR pero no al 80% HR. Esto último puede ser debido al colapso del material por el alto contenido del agua. El análisis de la expansión es particularmente relevante por la alternativa de usar materiales basados en micelio para aplicaciones donde los materiales estén colocados entre otros materiales, como es el caso de las bovedillas en los forjados.

Se midió la absorción de agua cuando se coloca la muestra sobre el agua. Se colocaron en contenedores llenos de agua destilada a 23°C y se pesaron después de 1, 2, 4, 24, 48, 96 y 192 h. Para cada pesada, las muestras se sacaban de la superficie del agua y manualmente se les retiraba el agua superficial con papel filtro y se pesaban en el 1 min después de retirarle en agua.

Colocar los materiales encima del agua dio como resultado un incremento del peso para todas las muestras. TSN mostró la menor absorción de agua, esto seguramente se

explica porque la piel del hongo *T. versicolor* es repelente al agua. En contraste, TPN y PAN mostraron las absorciones más altas. No se encontró relación entre la absorción de agua y el tipo de hongo, sustrato o condiciones de presión usadas. Los resultados de las pruebas realizadas en el estudio de (Appels et al., 2019) se muestran en la Tabla 5.

En línea con otros estudios que informan que *P. Ostreatus* con sustrato de fibras de cereal absorbió hasta un 278% en 24 horas mientras que material de micelio con base de algodón y hongo desconocido absorbió 198% de agua después de 168 horas de inmersión.

Material	Incremento peso 60% HR (%)	Incremento peso 80% HR (%)	Expansión espesor 60% HR (%)	Expansión espesor 80% HR (%)	Incremento peso después de colocar material en agua (%)
TPN	8,22 +- 0,25	10,44 +- 0,17	0,29 +- 1,19	5,43 +- 1,38	436 +- 73
TSN	5,71 +- 0,12	11,63 +- 0,10	6,72 +- 2,81	-0,47 +- 1,21	43 +- 5
TPC	7,26 +- 0,09	10,96 +- 0,20	0,93 +- 0,41	1,98 +- 0,78*	246 +- 8
PPN	3,87 +- 0,32	10,26 +- 0,31	24,24 +- 4,61*	-5,13 +- 1,64	279 +- 2
PPF	4,94 +- 0,30	10,00 +- 0,10*	21,06 +- 1,68*	0,96 +- 0,26	262 +- 8
PPC	7,09 +- 0,27	10,92 +- 0,26*	0,97 +- 0,57	2,5 +- 0,56*	239 +- 3
PAN	3,15 +- 0,14	7,57 +- 0,14	18,74 +- 4,16	0,57 +- 2,62	508 +- 76
PAF	3,74 +- 0,18	7,84 +- 0,20	22,12 +- 1,07*	-2,96 +- 1,08	238 +- 1
PAC	5,80 +- 0,11	8,12 +- 0,30	-1,93 +- 2,12	-0,14 +- 1,64	281 +- 5

Tabla 5. Incrementos de peso (%) a 60% HR y 80% HR, expansión del espesor (%) de las muestras a 60% HR y 80% HR e incremento de peso (%) después de colocar en material en agua. Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas (t-test,  $p < 0,05$ ).

El estudio de (Haneef et al., 2017) que realizaba muestras con hongos, sustratos y procesos diferentes, mostraba resultados similares a los alcanzados por Appels y sus colaboradores.

En este caso, el análisis se realizó con muestras de *G. Lucidum* y *P. Ostreatus* en sustratos de celulosa pura y mezcla de celulosa con caldo de dextrosa de patata. Los sustratos se prepararon en laboratorio con el siguiente procedimiento: los sustratos se disuelven en TFA al 0,5 wt.% en probetas de vidrio de 60mL. Las probetas se sellan con parafilm y se colocan en un agitador de laboratorio durante 3 días formando una solución viscosa. Después, las soluciones obtenidas se reparten en placas de Petri y se guardan en una campana de extracción hasta la completa evaporación del disolvente (3-4 días). Se refieren estos dos tipos de sustratos como celulosa pura y celulosa-PDB. Se incuban las muestras a 25-30°C y 70-80% HR durante 20 días en una cámara y el material obtenido se coloca en un horno a 60°C durante 2 h para inhibir el crecimiento.

Este estudio concluye que todos los materiales analizados son bastante resilientes a la humedad, absorbiendo bajas cantidades de agua:

50% humedad relativa: absorción <4% independientemente del sustrato y la semilla.

85% humedad relativa: absorción 6% sin diferencias entre sustratos y semillas.

100% humedad relativa: P. Ostreatus en sustrato de celulosa-PDB presenta mayor absorción 20% frente al 12-13% del resto de las muestras.

Los resultados de ambos estudios están en línea con las especificaciones técnicas del material de micelio ya comercializado por Ecovative para aislamiento térmico MycoFoam:

Retención de humedad al 53,5% HR (%)	ASTM C1498	Oak Ridge National Lab.	8
Retención de humedad al 75% HR (%)	ASTM C1498	Oak Ridge National Lab.	12

Tabla 6. Especificaciones técnicas de MycoFoam de Ecovative.

A pesar de que los valores que caracterizan al material de micelio respecto a su comportamiento frente a la humedad son bajos y podrían cumplir lo exigido para los materiales de poliestireno expandido (IDAE, 2007), la exigencia de la norma EFHE para las piezas cerámicas parece ser más restrictiva.

La cuarta y última exigencia de la EFHE para las piezas de entrevigado es que el comportamiento de reacción al fuego de las piezas alcanzará al menos la clasificación M1 según UNE 23727:90. Las bovedillas fabricadas con materiales inflamables deberán resguardarse de la exposición al fuego mediante capas protectoras eficaces. También se debe tener en cuenta el Código Técnico de la Edificación CTE en su DB-SI (seguridad contra incendios). Según este requerimiento, la clasificación sería B-s3-d0 (Palma, 2014).

El mencionado estudio de (Haneef et al., 2017) también analizaba las muestras obtenidas en base a su caracterización termomecánica. Respecto a este tema, concluye que no hay diferencias significativas en el comportamiento de las diferentes muestras analizadas en función del tipo de hongo y el sustrato alcanzando todas ellas una degradación térmica única que empieza a los 225°C y termina cerca de los 300°C. Esta alta temperatura de degradación prueba que son materiales térmicamente estables, lo que expande su campo de aplicación.

Otro estudio que analizaba el comportamiento del material de micelio frente al fuego es el de (Jones et al., 2018). De acuerdo con este estudio, el material de micelio mostraba un tiempo de ignición que es similar en comparación con la espuma de poliestireno extruida aunque significativamente más corto que el de los aglomerados. La temperatura de ignición estaba en el rango de entre 200 y 400°C, aunque el micelio no mostraba propiedades intrínsecas ignífugas sino que sólo actuaba como un cemento. Esto era debido a la pasivación que ocurre en el micelio cuando sus capas superficiales de queman, estas capas quemadas evitan el contacto del oxígeno con el material lo que restringe la combustión del micelio.

El ratio de desprendimiento de calor (HRR) es particularmente importante para modelizar el crecimiento y expansión del fuego. Tanto (Holt et al., 2012) como (Jones et al., 2018) reportaron valores similares para los materiales de micelio, en unos valores medios de HRR de 55-75 y 33-107 kW/m<sup>2</sup> respectivamente y picos de HRR de 66-116 y 79-185 kW/m<sup>2</sup> respectivamente. Esto significa que el pico ocurría en el primer minuto después de la ignición. (Jones et al., 2018) también informó que los valores más altos de

HRR se producen cuando se incrementaba la fracción de grano en el sustrato, debido a su poder calorífico.

El estudio de (Jones et al., 2018) se realizó con sustratos de cáscaras de arroz y granos de trigo empapados 48 h en agua ultrapura y esterilizados a 121°C y 103,4 kPa durante 40 minutos antes de su uso. Los sustratos y aditivos se combinaron en distintos ratios con *Trametes versicolor*. El sustrato inoculado se depositó en moldes de plástico sellados e incubados bajo unas condiciones ambientales de 25°C y 50% HR durante 12 días. Tras este periodo, las muestras se secaron a 50°C durante 48 horas para quitar completamente la humedad absorbida y desnaturalizar el material de micelio.

Como resumen y en correlación con los estudios revisados, los materiales de micelio tendrían la media más baja de HRR y un tiempo de combustión súbita más largo que los materiales sintéticos de la construcción. También liberarían menos humo y CO<sub>2</sub>.

El material de micelio MycoFoam comercializado por Ecovative en sus especificaciones técnicas presenta los siguientes valores frente al fuego:

Propagación de llama	ASTM E84	QAI	20
Emisiones de humo	ASTM E84	QAI	50

Tabla 7. Especificaciones técnicas de MycoFoam de Ecovative.

Lo que lo clasificaría con clase A según la Normativa Americana (propagación de llama entre 0 – 25, emisión de humo entre 0-450).

El material de micelio de la colección acústica de Mogu en sus especificaciones técnicas presenta:

	Fire-proof	Natural touch
Tipología del retardante de llama	Libre de metales pesados, no-halogenado, con base de agua, eco-friendly	Sin utilización de retardante
Clasificación UNE EN 13501-1	B-s1-d0	D-s2-d0

Tabla 8. Especificaciones técnicas del material de la colección acústica de Mogu.

Por lo tanto parece que el material de micelio, al igual que ocurre con las bovedillas de EPS, necesitaría algún tipo de tratamiento o revestimiento para alcanzar la clasificación requerida de reacción al fuego del forjado en *condición final de uso*.

Como conclusión, y a la vista de todas las características analizadas, se podría determinar que las bovedillas fabricadas con material de micelio cumplirían con las exigencias de la normativa existente en relación a su uso como aligeramiento de forjados.

### 3.6.3. Ventajas e inconvenientes de bovedillas de material de micelio frente a bovedillas de EPS

En este apartado se trata de analizar si, en función de las características exhibidas por ambos materiales, las bovedillas realizadas con material de micelio serían una alternativa factible a las bovedillas de EPS y, por lo tanto, a las de hormigón y cerámicas.

La primera y principal ventaja de las bovedillas fabricadas con material de micelio es su sostenibilidad. Se trata de un material de origen orgánico que además reutiliza productos de deshecho de la agricultura o forestales. Su proceso de fabricación no implica procedimientos complicados con altas temperaturas ni grandes gastos energéticos. Al finalizar su vida útil el material puede ser desmontado, devuelto a la tierra donde es totalmente compostado.

Por el contrario, los otros tipos de bovedillas, de EPS, hormigón o cerámicas, tienen su origen en extracciones de material de la tierra lo que puede llevar al agotamiento de estos recursos, sus procesos de fabricación implican mayores gastos energéticos y, al finalizar su ciclo de vida en la construcción suelen ser transportadas a vertedero.

Las bovedillas de material de micelio se pueden considerar como un material ligero. Si bien tienen una densidad superior a las bovedillas de EPS, unas diez veces superior, ésta es inferior en el mismo rango, unas diez veces, a las densidades de las bovedillas de hormigón o cerámicas.

Por lo tanto, el uso de las bovedillas de micelio llevaría a una reducción del peso propio de la estructura al igual que las bovedillas de EPS, si bien esta reducción de peso sería inferior. Este menor peso de las bovedillas, tal y como se vio en el apartado 3.6.1.2. con las bovedillas de EPS, redundaría en un mejor funcionamiento de las tensiones y las deformaciones, un menor dimensionamiento de los pilares, vigas y cimentación y una reducción del acero necesario para armarlos con la consiguiente reducción de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> tanto en la fabricación del mismo como en la construcción. También, este menor peso de las bovedillas podría redundar en un rendimiento en el montaje y colocación, superior respecto a las bovedillas más pesadas.

Como conclusión para este punto, se podría determinar que las bovedillas de material de micelio representarían una ventaja respecto a las de hormigón y cerámicas por su menor peso pero, una desventaja respecto a las de EPS.

La otra ventaja del uso de bovedillas de EPS en los forjados es el aislamiento térmico. En este aspecto el análisis de las bovedillas de material de micelio es similar al realizado en el aspecto del peso analizado más arriba.

El EPS es un material que se utiliza como aislamiento térmico en forma de paneles en la construcción debido a sus valores de conductividad térmica bajos que varían entre 0,030 y 0,050 W/mK. Por lo tanto, un forjado con este material conseguirá aislar mejor térmicamente el edificio.

En general, las conductividades del material de micelio son algo más altas que las del poliestireno expandido, si bien en materiales de micelio ya comercializados para

aislamientos térmicos y acústicos se alcanzan valores de 0,037 y 0,050 W/mK, muy similares a los del poliestireno expandido. Estas conductividades son mucho más bajas que las de los bloques de hormigón, 0,35-0,79 W/mK y el material cerámico, 0,49-0,87 W/mK.

Por lo tanto, se puede concluir que el uso de bovedillas fabricadas con material de micelio contribuiría claramente al aislamiento térmico del edificio, si bien en valores ligeramente inferiores a las bovedillas de EPS.

Respecto a las desventajas del uso de bovedillas de EPS en comparación con las de hormigón o cerámicas, se podría decir que las bovedillas de material de micelio reducirían esos inconvenientes.

La desventaja principal de usar las bovedillas de EPS en los forjados es un menor aislamiento acústico. Como se vio en el apartado 3.6.1.2. la masa es la mejor propiedad que puede tener un material para aislar acústicamente. Por eso todos los forjados aligerados tienen un peor comportamiento acústico que una losa de hormigón macizo y entre estos el que tiene menor masa es el aligerado con bovedillas de EPS, lo que hace que sean los forjados con peor comportamiento acústico. En este aspecto, las bovedillas de material de micelio mejorarían el aislamiento acústico de los forjados respecto a los de bovedillas de EPS puesto que, como ya se ha mencionado, las densidades y pesos del micelio son unas 10 veces superiores a las del poliestireno expandido. Y no sólo por la densidad y el peso, también, por sus propiedades intrínsecas para la absorción del sonido. En la actualidad el material de micelio se empieza a comercializar como un producto para la mejora del aislamiento acústico en paredes y techos.

Respecto al comportamiento frente al fuego, el material de micelio tendría una clasificación mejor que el poliestireno expandido, que tiene una clasificación de euroclase E según la UNE EN 13501-1. Sin embargo ambos, tal y como exige el Código Técnico de la Edificación, alcanzarían los valores exigidos dentro del forjado como condición última de uso con las protecciones o revestimientos adecuados.

Como se indicó en el apartado 3.6.1.2., el poliestireno expandido es un material con porosidad muy baja por lo que no existe adherencia con otros revestimientos. Para mejorar esta circunstancia se realizan ranuras o resaltes en la cara de la bovedilla que debe ser revestida para que la pasta tenga un mayor agarre mecánico o se usan yesos especiales con aditivos añadidos que mejoren la adherencia química pero que encarecen el revestimiento. El material de micelio tiene mayor porosidad que el poliestireno expandido por lo que su comportamiento al ser revestido podría ser mejor y necesitar menos tratamientos que encarezcan el proceso.

La última desventaja mencionada en el apartado 3.6.1.2. es la referida a que los forjados de EPS pueden absorber cargas colgadas pero con mayores dificultades que sus competidores. En este aspecto la bovedilla de material de micelio mejoraría el comportamiento de la bovedilla de EPS puesto que al tener una mayor densidad y peso podría soportar cargas colgadas mayores.

### 3.6.4. Conclusiones

Como resumen del análisis de las características de los materiales y de las ventajas y desventajas de uso en función de las mismas, se puede concluir que bovedillas fabricadas de material de micelio:

- Supondrían un aligeramiento de la estructura mayor que las bovedillas de hormigón y cerámicas pero menor que las de EPS.
- Mejorarían el aislamiento térmico de los forjados de bovedillas de hormigón y cerámicas, y prácticamente alcanzarían los valores de los forjados de bovedillas de EPS.
- No alcanzarían el aislamiento acústico de los forjados de bovedillas de hormigón o cerámicas pero superarían los valores de los forjados de bovedillas de EPS.
- Tendrían el mismo comportamiento frente al fuego que el resto de forjados ya que, en su condición final de uso, alcanzaría las clasificaciones exigidas.
- Posiblemente no necesitarían ningún refuerzo adicional para la adhesión de los revestimientos mejorando las condiciones de las bovedillas de EPS.
- Soportarían menos cargas colgadas que las bovedillas de hormigón o cerámicas pero más que las bovedillas de EPS.
- Favorecerían el cuidado del medio ambiente por su origen orgánico y su biodegradabilidad, supondrían un menor coste y gasto energético de producción y favorecerían la economía circular.

#### **4. Tecnologías de fabricación aditiva para productos poliméricos derivados del estudio.**

Existe una necesidad crítica de desarrollar compuestos poliméricos imprimibles para alto rendimiento. Se están explorando numerosas tecnologías de fabricación, denominadas fabricaciones aditivas para productos poliméricos, debido a las propiedades mecánicas y a las funcionalidades intrínsecamente limitadas de las piezas impresas de polímeros puros. La impresión 3D ofrece muchas ventajas en la fabricación de materiales compuestos, incluida una geometría de alta precisión, rentable y personalizada. El desarrollo de metodologías para la formación y la búsqueda de un óptimo rendimiento de los compuestos poliméricos reforzados con partículas, fibras y nanomateriales se va a convertir en una actividad prioritaria en la ingeniería de materiales. Existe una necesidad crítica de desarrollar compuestos poliméricos imprimibles para alto rendimiento.

No todos los polímeros extruibles por fusión exhiben una capacidad de impresión eficiente para FDM. Entre todos los métodos, el modelado por deposición fundida (FDM) o la impresión tridimensional (3D) de extrusión por fusión es el más popular. Con FDM, los objetos 3D se producen a través de la deposición secuencial de capas de polímero fundido. En esta, la deposición se logra empujando un monofilamento sólido de polímero (diámetro, 2 a 3 mm) a través de una cámara cilíndrica calentada, que es donde se funde. El filamento sólido que actúa como un pistón empuja la masa fundida a través de una boquilla caliente.

El mercado de materiales utilizados en la impresión basada en extrusión por fusión es muy grande y actualmente está dominado por los termoplásticos a base de petróleo. A pesar de los beneficios que ofrece la madera y los materiales de origen vegetal para la fabricación aditiva, el mercado sigue siendo limitado, con la notable excepción del ácido poliláctico (PLA) para FDM. Sin embargo, el PLA tiene malas propiedades térmicas y mecánicas, lo que lo hace inaceptable para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Si bien los esfuerzos para mejorar las propiedades termomecánicas del PLA son prometedores, otros investigadores han optado por estudiar biofeedstock alternativos.

Parece que se abre el camino para valorizar la lignina mediante la fabricación aditiva de compuestos sostenibles de alto rendimiento para la industria de impresión 3D. Lo que permitiría la sustitución de los polímeros de origen termoplástico utilizados en la industria del modelado por deposición fundida, sustituyendo el ABS [acrilotrilenobutadieno-estireno] de la mezcla final del compuesto filamentoso [con nylon], por un polímero de origen netamente orgánico. Un análogo de ABS integrando lignina en caucho de nitrilo-butadieno.

Hasta la fecha se ha desarrollado un producto de origen orgánico compuesto de un 40% a un 60%, en peso, con materiales poliméricos sintetizados con lignina, formulados por

un proceso libre de solventes y que exhiben una capacidad de procesamiento limitada por: (a) una ventana óptima de temperatura, (b) velocidad de corte y/o (c) velocidad de alimentación del filamento.

El objetivo que se plantea es crear un compuesto renovable a base de lignina, que reforzado con fibras muestre propiedades mecánicas más allá de lo actualmente conocido [extraordinarias] y una capacidad de impresión 3D con mejores rendimientos para el tipo FDM. Hasta la fecha, el primer informe de un polímero renovable que contiene ~ 50% en peso de lignina no modificada y supera a los termoplásticos básicos, como las resinas de poliestireno de alto impacto (HIPS), en términos de rendimiento mecánico y capacidad de impresión 3D es “A path for lignin valorization via additive manufacturing of high-performance sustainable composites with enhanced 3D printability”, publicado en Science Advances, el 14 de diciembre de 2018, donde se demuestra que el material resultante exhibe una viscosidad reducida y una capacidad de impresión altamente eficiente incluso después de cargar con el 16% [en peso] de fibras de carbono picadas (CF) como agente de refuerzo, exhibiendo viscosidades más bajas que las de una resina imprimible pura derivada del petróleo.

Deben abrirse nuevas vías de uso de lignina aislada como materia prima para formular materiales de impresión 3D que obtengan características mecánicas y de impresión superiores a las actuales. Los resultados de la investigación deberían dar como resultado ingresos adicionales para las industrias de procesamiento de biomasa a través de la valorización de la lignina.

## 5. Bibliografía

- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., ... Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design*, *161*, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Capilla-González, G., Plascencia-Mora, H., Torres-Cisneros, M., Aguilera-Cortés, L. A., & Diosdado-De la Peña, J. A. (2013). Optimización topológica de una bovedilla de espuma de poliestireno con mezcla de densidades. *Dyna (Spain)*, *88*(4), 444–452. <https://doi.org/10.6036/5445>
- Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B., & Neubauer, P. (2019). Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biology and Biotechnology*, *6*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>
- Europa. (2015). Comunicación de la Comisión al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones - Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. *Diario Oficial de Las Comunidades Europeas*, (2 de diciembre de 2015 (614)), 1–24.
- Frey, M., Schneider, L., Masania, K., Keplinger, T., & Burgert, I. (2019). Delignified Wood-Polymer Interpenetrating Composites Exceeding the Rule of Mixtures [Research-article]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *11*(38), 35305–35311. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11105>
- Frey, Marion, Widner, D., Segmehl, J. S., Casdorff, K., Keplinger, T., & Burgert, I. (2018). Delignified and densified cellulose bulk materials with excellent tensile properties for sustainable engineering. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *10*(5), 5030–5037. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18646>
- Frey, Marion, Zirkelbach, M., Dransfeld, C., Faude, E., Trachsel, E., Hannus, M., ... Oyj, S. E. (2019). Fabrication and design of wood-based high-performance composites. *Journal of Visualized Experiments*, *2019*(153), 1–8. <https://doi.org/10.3791/60327>
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., ... Savino, E. (2019). Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability*, *11*(1), 281. <https://doi.org/10.3390/su11010281>
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*, *7*(December 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep41292>
- Heisel, F., Lee, J., Schlesier, K., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., ... Hebel, D. E. (2017). Design, Cultivation and Application of Load-Bearing Mycelium Components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism. *International Journal of Sustainable Energy Development*, *6*(1), 296–303. <https://doi.org/10.20533/ijсед.2046.3707.2017.0039>
- Holt, G. A., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J. D., & Pelletier, M. G. (2012). Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, *6*(4), 431–439.

- <https://doi.org/10.1166/jbmb.2012.1241>
- IDAE. (2007). *Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios Soluciones con Aislamiento de Poliéstireno Expandido ( EPS )*. 1–67. Retrieved from [www.idae.es](http://www.idae.es)
- Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., & John, S. (2018). Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire and Materials*, *42*(7), 816–825. <https://doi.org/10.1002/fam.2637>
- Lelivelt, R. J. J., Lindner, G., Teuffel, P., & Lamers, H. (2015). The production process and compressive strength of Mycelium-based materials. *First International Conference on Bio-Based Building Materials*, (2015).
- Macarthur, E. (2020). Towards the circular economy - Economic and Business Rationale for an Accelerated transition. *Ellen Macarthur Foundation Rethink the Future*, 100.
- Madrid, C. De. (2004). “ *Instrucción Para El Proyecto Elementos Prefabricados. Modelo*, B., Juan, S. A. N., & Vigueta, P. (2014). *FICHA TÉCNICA Características Especiales :*
- Palma, J. B. D. E. (2014). *A n a p*.
- Paneles, A. Y., & Casetones, B. Y. (n.d.). *FICHA TÉCNICA AISLAMIENTOS Y PANELES . BOVEDILLAS Y CASETONES*. 1–3.
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Bayer, E., & McIntyre, G. (2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Industrial Crops and Products*, *51*, 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Lara, A. J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G., & Bayer, E. (2017). An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Industrial Crops and Products*, *95*, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042>
- Promoteur, P. (2019). *Investigation of the environmental impact and circularity potential of sandwich panels in commercial buildings : Designing a sandwich panel with a mycelium core*.
- S.A., C. (n.d.). *Bovedillas de EPS, mayor rendimiento y eficacia*.
- Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., ... Hu, L. (2018). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*, *554*(7691), 224–228. <https://doi.org/10.1038/nature25476>
- Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith, G., & Jones, P. (2018). Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *121*(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>
- Yang, Z. (Joey), Zhang, F., Still, B., White, M., & Amstislavski, P. (2017). Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *29*(7), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866)