



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

Artesón aligerante para losa: constituido de micelio

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de tecnologías**

**PRESENTA:
Arq. Oscar Pérez Jiménez**

**TUTOR/A PRINCIPAL
Dra. en Arq. Maribel Jaimes Torres
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM**

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Mtro. en C. Eliezer Hernández Mecinas
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNAM

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM

Dra. en Biol. Estela Sandoval Zapotitla
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Octubre de 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



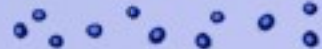
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



*PROGRAMA DE MAESTRÍA Y
DOCTORADO EN ARQUITECTURA*



Artesón aligerante para losa: constituido de micelio

TESIS
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA**
En el campo de conocimiento de tecnologías

PRESENTA:

Arq. Oscar Pérez Jiménez

TUTOR/A PRINCIPAL

Dra. en Arq. Maribel Jaimes Torres

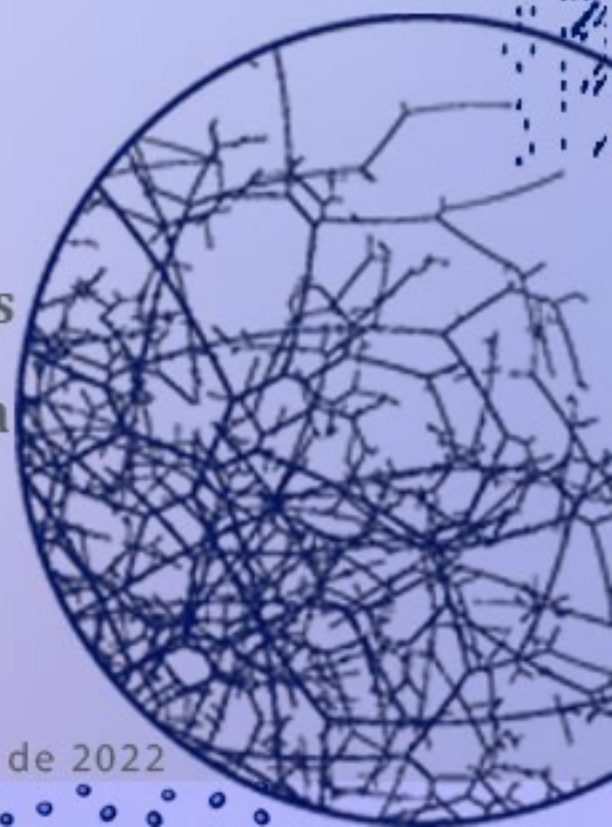
MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

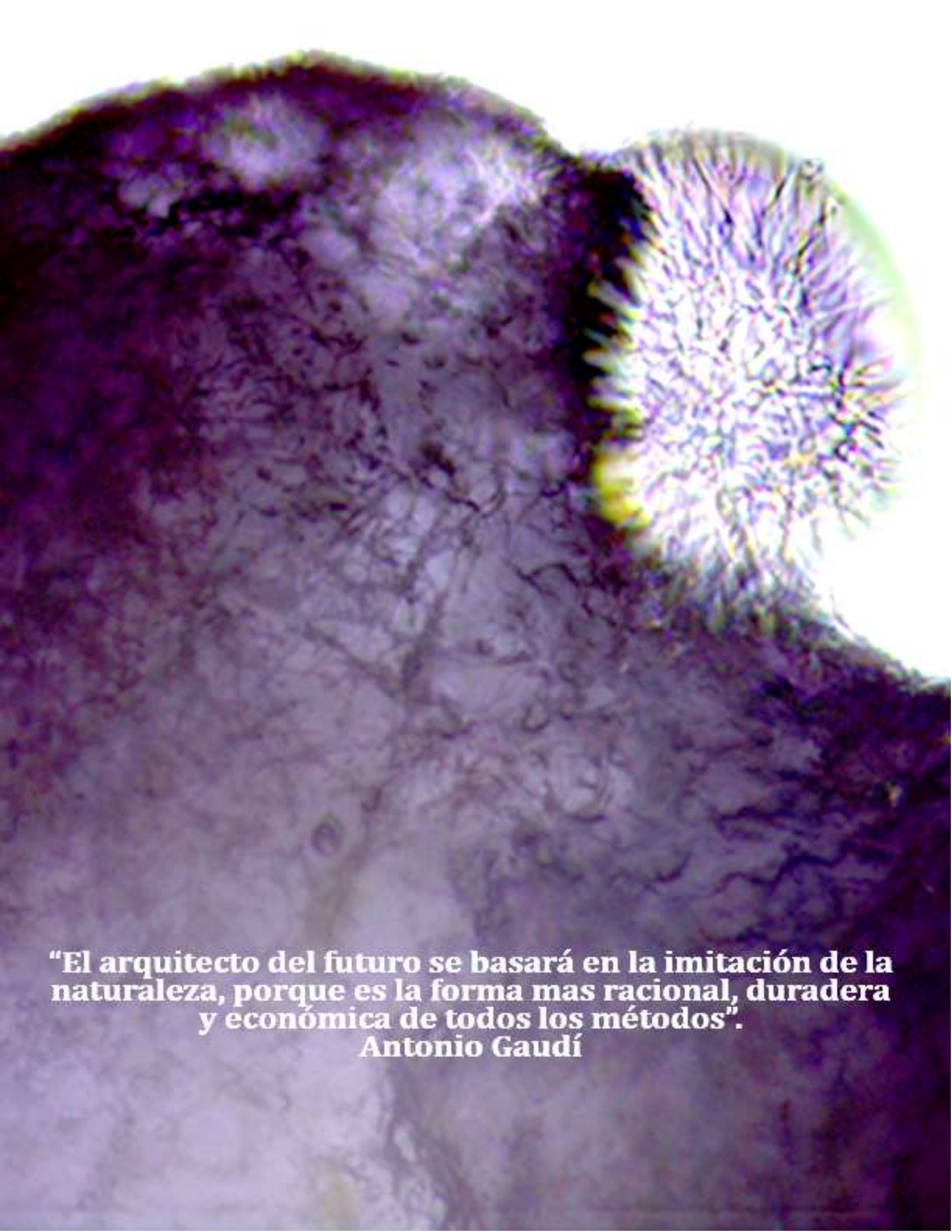
Mtro. en C. Eliezer Hernández Mecinas

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

Dra. en Biol. Estela Sandoval Zapotitla

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos





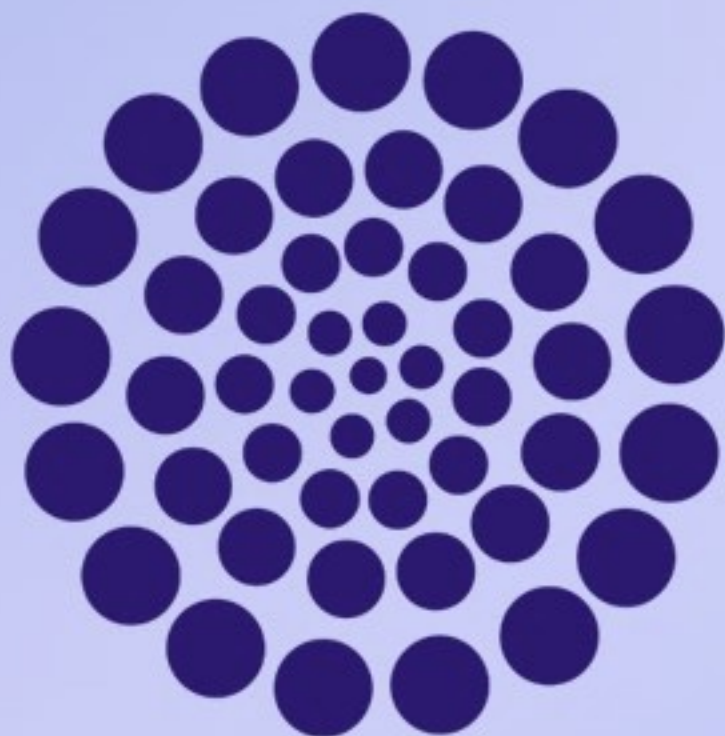
“El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma mas racional, duradera y económica de todos los métodos”.

Antonio Gaudí

Índice

Introducción	8
Justificación	8
Hipótesis	10
Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos particulares	10
Presentación del proyecto de investigación	11
Visión del proyecto	11
Ideal del proyecto	11
Misión del proyecto	11
Objetivo del proyecto	11
Marco teórico	12
Seguir un proceso circular y no lineal de consumo	13
De la cuna a la cuna (economía circular)	14
Vivir en un nuevo mundo material	15
Antecedentes	16
Biocompuestos de micelio en la literatura académica	17
Marco conceptual	22
Definición de material compuesto	23
Concepción del "bio"	23
Definición de biopolímero	23
Definición de biomateriales	24
Definición de biocompuesto	24
Definición de micelio	24
Definición de lignina, celulosa y hemicelulosa	25
Definición de compostaje	25
Marco histórico	27
Los materiales compuestos en la antigüedad	29
La revolución industrial – primer punto de quiebre	30
La segunda guerra mundial	32
La era del plástico	33
Último cuarto del siglo xx – segundo punto de quiebre	35
Visión sistémica del problema	37
Planeación estratégica	37
Componente 1: micelio	38
Componente 2: sustrato	38
Componente 3: condiciones	38
Componente 4: estrategia	38
Componente 5: caracterización	38

Descripción del producto de investigación esperado	39
Explicación del método prospectivo para la creación de escenarios futuros	39
Escenarios futuros de la aportación	39
Infografía de escenarios posibles de aportación	40
Método y plan de trabajo	41
Tipo de micelio seleccionado	44
Tipo de sustrato	44
Proceso de fabricación	44
Propiedades físico-mecánicas de compuestos de micelio	45
Equipo y material	46
Experimentación: obtención del biocompuesto	48
Primeras exploraciones	48
Etapa I	50
Etapa II - diseño de molde	51
Etapa III - preparación de sustrato	52
Etapa IV	53
Caracterización del material	54
Normatividad	55
Criterios de inclusión, exclusión y eliminación	56
Instrumentos de medición	57
Peso seco - densidad	63
Ensayos de compresión	64
Ensayos de flexión	67
Ensayos de absorción de agua	70
Ensayos de solubilidad	72
Ensayos de biodegradación	74
Ensayos de microscopía	76
Validación de prototipo	80
Limitaciones de investigación	86
Análisis y discusión de resultados	87
Humedad - densidad	88
Ensayo de compresión	88
Ensayo de flexión	89
Ensayo de absorción de agua.	89
Ensayo de solubilidad	90
Ensayo de biodegradación	90
Ensayo de microscopía	90
Validación de prototipo	90
Comparación con eps	91
Conclusiones	92
Aportación del micelio a la resistencia mecánica	93
Sustitución del eps	93
Materiales biológicos en la construcción	93
Bibliografía	95



CONACYT

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de esta investigación.



Instituto de
Investigaciones
en Materiales

Al Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Instituto de Investigaciones en Materiales, bajo la dirección del M. en C. en Ing. de Materiales: Eliezer Hernández Mecinas.



Instituto
de Biología

UNAM

Al Laboratorio de Anatomía Vegetal del Instituto de Biología, bajo la dirección de la Dra. en Biol. Estela Sandoval Zapotitla.

Introducción

La contaminación del medio ambiente es un problema, que afecta tanto la calidad de vida del ser humano, como de los seres vivos del planeta y es consecuencia del proceso lineal de consumo. Tal proceso consiste en extraer recursos naturales para la elaboración desmesurada de productos que, al finalizar su vida útil y/o utilización, se desechan y se eliminan, sin considerar su tiempo de degradación, además, de que por mucho tiempo no existió, una cultura del reciclaje y/o información sobre el uso alternativo de los desechos sólidos.

Entre los productos del proceso lineal de consumo se encuentra el poliestireno expandido, que en la industria de la construcción se utiliza como elemento aligerante/relleno en la elaboración de losa nervada: pero la degradación de este material lleva cientos de años; así como sus propiedades y características no son amigables con el medio ambiente, por esta razón fue clasificado en 1986 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) como el quinto producto cuya fabricación genera más desechos peligrosos, utilizándose 1.5 litros de petróleo por cada 1m³ de material, ante esta situación existe la necesidad de crear un nuevo material, el cual sea amigable con el medio ambiente y siga un proceso circular de producción.

Esta investigación esta alineada con los conceptos del biomimetismo que consiste en la imitación de los modelos, sistemas, procesos y elementos existentes en la naturaleza, para resolver, optimizar e innovar para mejorar la calidad de vida humana, siguiendo un proceso circular de la cuna a la cuna, en la cual el concepto desperdicio no exista, consecuentemente busca sentar las bases para la creación de un nuevo material biocompuesto utilizando el micelio: como material matriz en combinación con el cartón.

Además de su biodegradabilidad. Los materiales renovables a base de micelio tienen el potencial de contribuir a la nueva economía al reemplazar los productos a base de petróleo como los plásticos. Estos bioproductos podrían utilizarse, por ejemplo, como aislamiento térmico y acústico y embalaje (V.W. Appels et al. s/f).

Justificación

La agencia de la ONU publicó en 2019 un informe sobre los plásticos de un solo uso. De acuerdo al documento, resalta que la contaminación por plásticos en el mar ha ido en aumento considerablemente en los últimos años y se prevé que se duplique para 2030, con consecuencias nefastas para la salud, la economía, la biodiversidad y el clima.

El informe destaca que el plástico representa el 85% de los residuos que llegan a los océanos y advierte que, para 2040, los volúmenes de este material que fluirán hacia el mar casi se triplicarán, con una cantidad anual de entre 23 y 37 millones de toneladas. Esto significa alrededor de 50 kg de plástico por metro de costa en todo el mundo (Anón 2021).

... Algunos estudios sugieren que las bolsas de plástico y recipientes de espuma de poliestireno pueden tardar hasta miles de años en descomponerse, contaminando el suelo y el agua, y presentan considerables peligros de ingesta, asfixia y enredo para la vida silvestre terrestre y marina. Debido a su ligereza y diseño globular, las bolsas de plástico son fácilmente llevadas por el aire, y finalmente terminan yaciendo en la tierra y el mar (United Nations Environment Programme 2018).

Las bolsas de plástico pueden bloquear las vías fluviales y agravar los desastres naturales. En 1988,

las deficiencias en el sistema de alcantarillado junto con desagües tapados por los desechos de bolsas de plástico contribuyeron a devastadoras inundaciones en Bangladesh, causando varios muertos e inundando dos tercios del país (United Nations Environment Programme 2018).

En el contexto de que las ciudades del futuro no se construirán de la misma manera a través del consumo de recursos finitos y contaminación ambiental, esta investigación se desarrolla bajo el enfoque de la economía circular el cual busca comprender el ciclo de vida de los productos, desde su producción, utilización, reutilización, reciclaje o bien su reintegración a la naturaleza con la finalidad de imitar a la naturaleza con un ciclo cerrado en la cual el concepto desperdicio no existe.

Así también, esta investigación considera los objetivos de la campaña de la ONU; mares Limpios: para reducir drásticamente el consumo de plásticos desechables y erradicar el uso de micro plásticos que contaminan los océanos.

De manera similar con el Plan Nacional de Desarrollo (PND) del Gobierno de México referente a objetivos y estrategias prioritarias, en el rubro de política social, bajo el enfoque de desarrollo sostenible, en la que se sientan las bases para futuras exploraciones de materiales biológicos en la construcción con el enfoque del biomimetismo y la Mycotectura.

Hipótesis

Mediante la utilización del micelio (matriz) y cartón (refuerzo), se obtendrá un nuevo material biocompuesto, que cumpla con los valores mínimos establecidos por normatividad (NMX-C-137-ONNCCE-2010) de flexión, compresión, pero con mayor biodegradabilidad, como elemento aligerante en losa.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un biocompuesto (arteson) a base de matriz de micelio y refuerzo de cartón, para la obtención de un material con funciones idóneas de forma mecánica y física para ser usado como aligerante en las construcciones de la ciudad de México.

Objetivos particulares

- Diseño de molde: determinar medidas, espesor y geometría.
- Diseño de mezcla: cartón machacado, en trozos y almidón (TPS).
- Analizar el comportamiento y crecimiento biológico del micelio.
- Determinar y conocer las propiedades de compresión: ASTM D1621: prueba de compresión de plásticos celulares rígidos.
- Determinar y conocer las propiedades de flexión: ASTM D790 – Métodos de prueba estándar para las propiedades de Flexión de plásticos no reforzados y reforzados y materiales de aislamiento eléctrico.
- Determinar y conocer las propiedades de absorción de agua: ASTM D 2842: Método de prueba estándar para absorción de agua de plásticos celulares rígidos.
- Determinar y conocer las propiedades de solubilidad: ASTM D3132: Método de prueba estándar para el rango de solubilidad de resinas y polímeros.
- Determinar y conocer las propiedades de biodegradación: ASTM D5338: Método de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas, incorporando temperaturas termófilas.

Presentación del proyecto de investigación

“Como seres humanos, nuestra grandeza descansa no tanto en nuestra capacidad para rehacer el mundo, sino en el poder de rehacernos nosotros”.

W. Edwards Deming

Visión del Proyecto

Desarrollar un material natural (biocompuesto), multidisciplinario a través del micelio, por ende, que siga un ciclo de vida circular donde se integre nuevamente a la naturaleza, de tal forma que se pueda eliminar el concepto desperdicio (Zero waste)¹, de modo que sustituya a los materiales que actualmente se utilizan como elementos aligerantes en losa (poliestireno expandido).

Ideal del Proyecto

Obtener un material biocompuesto el cual se integrará a base de elementos naturales, para la fabricación de artesones como elementos aligerantes en losa, más aún implica diseñar un método de mezcla, determinar las condiciones necesarias de control ambiental para la reproducción del micelio, todo lo anterior mencionado será determinante para la obtención exitosa, así como funcionamiento ideal del prototipo final.

Misión del Proyecto

Producir un material de próxima generación (micotectura²), como una solución de construcción sostenible.

Objetivo del Proyecto

A través del conocimiento junto a la aportación multidisciplinaria entre química, biología y arquitectura: determinar y conocer las propiedades mecánicas (flexión, compresión), químicas (microscopía) y físicas (solubilidad, biodegradabilidad y biodegradación), en vista de desarrollar un material biocompuesto.

¹ Zero Waste, en español desperdicio Cero, esta filosofía de vida, trata en esencia de reducir al máximo la cantidad de basura que generamos para contribuir a la sostenibilidad y conservar el medio ambiente. El consumismo de la economía lineal nos ha llevado a demandar de forma masiva productos perjudiciales para el planeta sin tan siquiera percatarnos de ello. Pocas veces reparamos en que estamos utilizando productos con una vida útil muy corta. Tan corta, que la mayoría de ellos son de un solo uso, y acaban contaminando durante mucho tiempo terrenos y mares.

² La micotectura es un tipo de arquitectura viva que aprovecha las posibilidades que ofrece el micelio de los hongos para desarrollar construcciones sostenibles y de bajo coste.

MARCO TEÓRICO

**“Como seres humanos, nuestra
grandeza descansa no tanto en
nuestra capacidad para rehacer el
mundo, sino en el poder de
rehacernos nosotros”.**
W. Edwards Deming

Seguir un proceso circular y no lineal de consumo

Como se ha hablado anteriormente sobre la contaminación del medio ambiente, resultado de un proceso lineal de consumo, como consecuencia los residuos sólidos urbanos³, una economía lineal en la que el deseo de adquisición y acumulación de capital por parte de empresarios, se mide por producir de la manera más eficiente de hacer llegar la mayor cantidad de bienes a personas, la población está educada de tal manera para consumir en demasía sin pensar de manera crítica si es necesario adquirir estos materiales.

La infraestructura industrial está diseñada para la generación de crecimiento económico. Lo consigue, pero a expensas de otras necesidades vitales, como la salud humana, el ecosistema, la riqueza natural y cultural, e incluso la diversión y el disfrute. La mayoría de los métodos y materiales industriales son involuntariamente empobrecedores (McDonough y Braungart 2005).

La crisis ambiental es resultado de nuestro sistema social, productivo y consumismo, nuestra manera de existir y funcionar, sin embargo, enfrentar o hacerse cargo de esta realidad, ha llevado a parte de la sociedad a replantearse el modelo de producción, el modelo de vivir y relacionarnos con el medio ambiente, a través de un modelo más sostenible, una nueva revolución industrial, de tal manera que permita cambiar la forma en que hacemos y usamos las cosas, una vez más siguiendo un proceso circular de producción, donde todo aquel material que se produzca al finalizar su vida útil se reintegre nuevamente a la naturaleza.

Es posible alcanzar un sistema de producción y consumo respondiendo a la demanda de productos y servicios, un sistema sostenible debe responder a esta demanda sin alterar los ciclos naturales y sin empobrecer el capital natural, debe reducir la utilización de recursos naturales, más bien debe basarse en recursos renovables, garantizando además que estos se renueven y optimizando los recursos no renovables.

Sin embargo, hasta el momento la respuesta más simple a esta destrucción, de origen industrial, ha sido la de hallar un método menos dañino para el ecosistema, en donde conceptos como reducir, evitar, minimizar, sostener, limitar, detener, se han usado en la mayoría de las consideraciones ambientales de la industria actual.

Es por eso que. Uno de los retos de nuestra sociedad es la transición hacia una economía sostenible, con este fin, se debe reducir el uso de recursos no renovables para la producción de materiales y productos de consumo, ante esto, los materiales renovables basados en micelio tienen el potencial de

³ Los residuos sólidos urbanos son aquéllos que se producen en las casas habitación como consecuencia de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo, residuos de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques, o residuos orgánicos); los que provienen también de cualquier otra actividad que se realiza en establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias y los resultantes de lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (Anón s/f-c).

contribuir a la nueva economía al reemplazar los productos derivados del petróleo como los plásticos. Estos bioproductos podrían utilizarse, por ejemplo, como aislamiento térmico y acústico y embalaje (Appels et al. 2019).

...Diseñar materiales a partir de componentes que puedan ser arrojados al suelo o a los depósitos de compost⁴ para que se biodegraden de forma saludable tras su uso - en otros términos, que los productos sean consumidos. No es necesario que las botellas de champú, los tubos de dentífrico, los envases de yogur, helados o zumos, duren más décadas (e incluso siglos) que los productos que contienen (McDonough y Braungart 2005).

Estamos en un momento crucial del planeta que nos insta a diseñar nuevos materiales, con una perspectiva desde su ciclo de vida, reutilizable, biodegradable, compostable y se reintegre a la naturaleza al finalizar su vida útil.

De la cuna a la cuna (economía circular)

La Ellen MacArthur Foundation y Material Economics ⁵define a la economía circular como un enfoque del desarrollo económico para el beneficio de los negocios, la sociedad y el medioambiente en conjunto. En busca de desacoplar la dependencia del crecimiento económico a base del consumo de recursos finitos. La transición hacia fuentes de energía renovable y el uso de materiales renovables, resalta la importancia de que la economía funcione de manera efectiva a todas las escalas, siendo clave la participación y colaboración entre pequeñas y grandes empresas, de comunidades locales, ciudades y países, así como de las personas que las integran, el origen de la economía circular no es reciente; sin embargo, ha tomado mayor relevancia por la lucha en contra del cambio climático (Anón s/f-a).

Si en verdad la raza humana quiere prosperar, no hay mejor ejemplo que aprender a imitar a la naturaleza en su altamente efectivo sistema de la cuna a la cuna con respecto a los flujos de nutrientes y al metabolismo, en los cuales el propio concepto de desecho no existe, eliminar este concepto implica diseñar las cosas, los productos, los embalajes y los sistemas desde su puro origen, pensando que no existe el residuo, significa que los valiosos nutrientes contenidos en los materiales conforman y determinan el diseño: la forma sigue a la evolución, no solo a la función.

El modelo de producción que debemos instalar tiene que darse con base en unos principios simples de la naturaleza: todas las cosas y cualquier cosa que vive crea desperdicios, pero ningún desperdicio se desperdicia todo sigue un proceso circular. Cualquier cosa que no sea para uno es un insumo para el otro, y como tal el sistema se regenera gracias al insumo permanente de la energía solar, el compostaje o cualquier otro elemento natural que ayude a estos materiales a regresar a la naturaleza.

Una empresa debiera idealmente abarcar todas, o al menos la mayoría de esas fases y los múltiples procesos contenidos en cada una de las mismas. Tal fin no siempre es posible, dadas las necesidades de capital, de infraestructura y los potenciales problemas relacionados con la pérdida de foco estratégico en la especialización que debieran afrontar las empresas a causa de potenciales requeri-

⁴ Medio para la descomposición parcial o total de residuos, el compostaje es un proceso biológico aerobio (con presencia de oxígeno) que, bajo condiciones de ventilación, humedad y temperatura controladas, transforma los residuos orgánicos degradables en un material estable e higienizado llamado compost.

⁵ Ellen MacArthur es una fundación que desarrolla y promueve la idea de una economía circular. Trabaja con empresas, así como con el mundo académico, para la transición a una economía circular.

mientos de integración vertical hacia adelante o hacia atrás (Katz 2020).

Este ofrece las condiciones básicas que permiten aliviar la pobreza en primera instancia, y después aumentar la calidad de vida. La implementación rápida y exitosa de este nuevo modelo de producción y consumo depende, en primer lugar, de una penetrante descentralización de la producción, la distribución y la toma de decisiones. Si se emula el modelo de la naturaleza, entonces innumerables ineficiencias que están incorporadas al actual sistema centralizado serán eliminadas. Se generarán empleos locales e ingresos, y los problemas de desechos masivos que dominan las concentraciones de personas se evaporarán gradualmente (Pauli 1999).

Es decir, la economía circular aboga por utilizar la mayor parte de materiales biodegradables posibles en la fabricación de bienes de consumo, nutrientes biológicos para que éstos puedan volver a la naturaleza sin causar daños medioambientales al agotar su vida útil.

Vivir en un nuevo mundo material

La propuesta de la economía circular es un esquema donde el final de un proceso se convierte en un complemento de otro hasta que el ciclo se cierra, se busca encontrar productos que sean desecho de un ciclo como punto de partida para darle un uso que genere mejoras en las esferas: social, ambiental y económico.

Esta idea de generar ciclos cerrados implica una reducción del impacto en el medio ambiente por lo que se explota menos y se generan menos residuos, en este deseo de integrar los ciclos naturales en la economía circular, vale la pena pensar en los ritmos y tiempos de uso que existen, como se ha mencionado es necesario entonces desarrollar nuevos materiales que les tome poco tiempo descomponerse o de manera proporcional con los ciclos que le toma a la tierra generar los materiales para que el sistema pueda cerrarse, de tal manera de generar un nuevo mundo material para la construcción.

La ciudad del futuro no puede construirse dentro del derrochador sistema económico lineal actual, sino que requiere nuevos materiales alternativos y técnicas de construcción circular; y el siglo XXI enfrentará un cambio radical de paradigma en la forma en que producimos materiales para la construcción de nuestro hábitat (Heisel y Hebel 2019).

Ante esto las nuevas investigaciones apuntan a seguir a la naturaleza, inspirarse de ello para nuevas soluciones tecnológicas, el uso de materiales biodegradables, de base biológica, dichas investigaciones sobre patrones de la naturaleza para la arquitectura han revelado el potencial de observar el crecimiento biológico, para inspirar nueva planificación y procesos de construcción, en donde se reúnan profesionales de distintos campos con el único objetivo de crear un material.

Dentro de esta búsqueda por encontrar el desarrollo de nuevos materiales naturales que cumplan con las características antes mencionadas, se encontró el micelio característico por sus hifas que degradan: lignina, celulosa y hemicelulosa, los cuales la mayoría se encuentran en elementos derivados de los árboles y algunos terminan siendo elementos sólidos urbanos en este caso el cartón.



ANTECEDENTES

Biocompuestos de micelio en la literatura académica

Dentro de la investigación documental que se llevó a cabo, el cual abarca entre los años 2010 y 2022 se precisó que se encontrara información directamente relacionada con la construcción, en los cuales se muestra un interés que va creciendo en este campo, sin embargo la mayoría de la información encontrada no proporciona datos esenciales, tales como las especies de hongos, la composición del sustrato, las condiciones de incubación, los pasos adicionales de modificación del material, incluso en muchos casos sólo se habla de una mezcla sin obtener ningún objeto o prototipo final, a continuación se presentan los ejemplos más relevantes.

Philip Ross⁶ es pionero en experimentar con el micelio, para generar bloques de tabique en el cual se descubrió la buena capacidad de aislamiento térmico, sonoro, rigidez y absorción de impacto que posee este material.

Una empresa ubicada en Nueva York llamada Ecovative Design, comercializa el micelio desde 2006, dentro de los materiales que fabrican se encuentra la carne de origen vegetal, envases biodegradables y paneles rígidos para el aislamiento acústico en edificios, todo fabricado de la mezcla de residuos agrícolas y micelio.

El estudio The Living en Nueva York trabajó en cooperación con Ecovative Design en el Proyecto Hy-Fi, un pabellón que fue construido en el patio del MoMA, desarrollaron ladrillos de micelio, que crecieron en menos de una semana en moldes prismáticos a partir de residuos de tallos de maíz picados, al sumarse, los ladrillos se estructuraron en una torre de unos 12 metros de altura, al final de la exposición cuya duración fue de dos meses, se desmontó la torre y los ladrillos fueron llevados a compostadores, siguiendo su curso orgánico.

También se encuentra el diseñador industrial de Dinamarca Jonas Edvard Nielsen quien utiliza desechos para el desarrollo del micelio, material con el que fabrica una pantalla de lámpara y un textil, el producto de desecho con "forma de lámpara" se puede secar y utilizar como un material ligero, orgánico, compostable y sostenible.

Carlo Ratti Associati, en colaboración con la empresa energética Eni, desarrolló una estructura arquitectónica compuesta de micelio, presentada en la Semana del Diseño de Milán, llamado el "Jardín Circular" la cual es una estructura compuesta por una serie de arcos que se suman a un micelio de 1 km de longitud, esta misma fue llevada a un área de composta terminado el evento.

De manera similar Shell Mycelium Pavillion, es una empresa que nace como una crítica a los eventos temporales que dejan construcciones abandonadas: esta empresa trabaja un pabellón formado por una estructura de madera con la que se fusiona el micelio y de la que se alimenta, y crecerá hasta morir una vez que haya cumplido su propósito, esto ofrece una alternativa al diseño consciente a través de estructuras temporales, pero sobre todo se observa que el micelio tiene buen potencial para ser utilizado en la construcción.

(Román-Ramos, Luna-Molina, y Bailón-Pérez 2014) presentan en su artículo el desarrollo de un

⁶ Phil Ross es un artista y profesor estadounidense interesado en las posibilidades experimentales del diseño de hongos y materiales de construcción.

material constituido de micelio sobre sustrato a base de paja de trigo, el cual se piensa utilizar como encofrado para la construcción, el material obtenido se sometió a pruebas de resistencia a compresión. El material obtenido de la inoculación del hongo *Pleurotus Ostreatus*, de la familia 1 y 2, podría sustituir al poliestireno expandido (EPS) en las diversas aplicaciones estudiadas en cuanto a la resistencia mecánica y al comportamiento ante el fuego se refiere. Las familias 3 y 4 cumplen los requisitos mecánicos para ser utilizadas como encofrado perdido, pero no ocurre igual para el resto de aplicaciones estudiadas, aunque quizás haya podido deberse a que el tiempo que ha tenido el micelio para crecer ha sido insuficiente (Román-Ramos et al. 2014).

El artículo de Petra Gruber y Barbara Imhof analizan el enfoque del diseño biomimético en arquitectura aplicado al tema del análisis de crecimiento en biología. El proyecto se trabajó con el micelio de *Reishi* y *Oyster*, sobre materiales reciclados triturados de paja, madera y papel, uno de los principales temas que se abordó en el artículo fue sobre el tipo de molde y cómo influyen en el crecimiento del micelio.

Los primeros prototipos a partir de plantillas duras fueron problemáticos por una variedad de razones: la cubierta dura no permitía suficiente intercambio de gases, por lo que se pudrió en muchos experimentos. Las plantillas elaboradas con espuma de poliestireno también resultaron ser demasiado herméticas y tal vez demasiado bien aisladas térmicamente, por lo que el material comenzó a pudrirse. Otro desafío es la contracción del material de micelio en el proceso de secado, que es considerable y evita el uso de formas complejas. Los experimentos con tipos de plantillas más abiertos tuvieron más éxito (Gruber y Imhof 2017).

Rodríguez en su investigación, se centró en la exploración y experimentación de un nuevo material biobasado, compuesto a partir de la utilización del micelio y subproductos de la industria agrícola, pero sin destinar una aplicación directa del producto final. La etapa de experimentación permitió entender cómo se comporta el material en condiciones ambientales diferentes.

En un ambiente controlado (temperatura, humedad), el material no se degrada, pero sí presenta algunos cambios en la inspección visual (color, textura, porosidad) que no afectan su comportamiento físico mecánico. En un ambiente no controlado (temperatura, humedad, radiación, luz, entre otros) el material presenta cambios en su comportamiento físico mecánico ya que este comienza a degradarse y descomponerse (Rodríguez 2018).

El artículo de Yangang Xing explora la capacidad y conducción térmica del micelio, dentro de las conclusiones respecto al cultivo menciona lo siguiente: a partir de este estudio, se puede ver que diferentes especies tienen patrones de crecimiento dramáticamente diferentes dentro del sustrato y la unión. Por lo tanto, es importante seleccionar especies de hongos apropiadas para formar materiales aislantes para edificios. Al elegir hongos adecuados, se deben considerar varios factores: es deseable un crecimiento micelial rápido para unir el sustrato, pero las tasas rápidas de descomposición del sustrato son menos deseables (debilitando potencialmente los bloques). También es deseable un crecimiento uniforme en los bordes y en el medio de los bloques de sustrato (Xing et al. 2018).

Felix Heisel y Dirk E. Hebel, exploran el micelio como elemento estructural. El objetivo de activar estructuralmente el material dio como resultado la reinvención de la receta de crecimiento, la ampliación de dicho proceso del laboratorio a una escala semiindustrial y el desarrollo de todas las herramientas necesarias, así como la ingeniería de un concepto estructural que reacciona a las especificaciones del material del micelio (Heisel y Hebel 2019).

(Soh et al., 2020a) habla sobre el desarrollo de una pasta extruible para construir compuestos ligados a

micelio, en este estudio se combinaron materiales de desecho agrícola, microfibras de bambú, quitosano y micelio de *Ganoderma Lucidum*. La composición, probada bajo compresión después de 20 días de crecimiento del micelio, produjo un módulo de compresión de 40 kPa, en comparación con 240 kPa sin quitosano. (Soh et al., 2020a).

Siguiendo por esta línea, Adamatzky aborda el diseño y fabricación biológica de un edificio totalmente de micelio. Las ideas propuestas en este artículo conllevan al menos tres riesgos importantes. En primer lugar, hay muy pocos ejemplos de estructuras monolíticas cultivadas con hongos vivos en la literatura, y los riesgos de colapso, contaminación, crecimiento inhibido, incapacidad de controlar la forma, todos ellos siguen sin investigarse, especialmente en el contexto de estructuras de mayor escala de longitud que las que se han demostrado hasta ahora. En segundo lugar, podemos tener un problema de limitación de la capacidad de unión a la superficie exterior o de toxicidad de los polímeros y/o las nanopartículas metálicas. En tercer lugar, la conservación del monolito cultivado a gran escala podría ser difícil debido a las condiciones ambientales (Adamatzky et al. 2019).

Continuando con la exploración documental Elsacker examina la posibilidad de cultivar grandes bloques compuestos de micelio, producción robótica, usar materiales de micelio como un encofrado multifuncional y por último implementar la autocuración de organismos fúngicos. El cual, para los fines de esta investigación, son elementales los resultados de las pruebas mecánicas que se realizaron. Se llevaron a cabo pruebas de compresión con probetas cilíndricas (h: 38 mm, d: 100 mm) cultivadas durante 10, 20, 30 y 40 días, para comprender si el período de crecimiento prolongado afectaba las propiedades del material final después del secado. Los datos de los cuatro períodos de crecimiento varían significativamente (ANOVA unidireccional ordinario $p < 0,05$) y muestran una disminución de la fuerza del 25,3 % para los especímenes cultivados durante 40 días, en comparación con los especímenes cultivados durante 10 días. La disminución es menos pronunciada para los especímenes cultivados durante 20 días (3,4 %) y 30 días (6 %) (Elsacker et al. 2021).

La gama de técnicas de fabricación actuales para materiales de micelio es limitada y existen lagunas en el conocimiento sobre métodos de fabricaciones adicionales. La aplicación de métodos de modificación de procesamiento bioquímicos podría facilitar, expandir y mejorar significativamente las propiedades de los materiales actuales. Dichos estudios también pueden contribuir a la escalabilidad, mejorando así la viabilidad material y el potencial comercial (Attias et al. 2020).

A continuación, a modo de resumen, pero sobre todo mostrar los resultados que obtuvieron los autores se muestra la siguiente tabla.

Año	Título	Autores	Objetivo de la investigación	Resultados		
				Familia	Probeta	Resistencia a compresión al 10 % de deformación (MPa)
2013	Encofrado perdido constituido por paja cohesionada con micelio como sustituto del poliestireno expandido	Román-Ramos, J. D., Luna-Molina, F. J., Bailón-Pérez, L. J.	Sustituir, el poliestireno expandido. Comprobar si el material estudiado cumple algunos de los requisitos más relevantes para convertirse en un claro sustituto del EPS, basadas en propiedades mecánicas.	1	1.2	0,139
				3	3.6	0,032
					3.9	0,042
					3.12	0,046
					3.15	0,054

2017	Patterns of Growth— Biomimetics and Architectural Design	Petra Gruber y Barbara Imhof	Analiza el enfoque del diseño biomimético en arquitectura aplicado al tema del crecimiento en biología. Se cultivaron dos especies diferentes de hongos, Reishi y Oyster, en materiales reciclados triturados de paja, madera y papel.	"Los primeros prototipos de plantillas duras fueron problemáticos por una variedad de razones: la cáscara dura no permitía suficiente intercambio de gases, por lo que la descomposición ocurrió en muchos experimentos. Las plantillas molidas de espuma de poliestireno también demostraron ser demasiado herméticas y quizás también demasiado bien aisladas térmicamente, por lo que el material comenzó a pudrirse... Los experimentos con tipos de plantillas más abiertos tuvieron más éxito. Como el crecimiento del micelio está ligado al intercambio de gases, el diámetro de los elementos se limitó a unos pocos centímetros".															
2018	Material biobasado compuesto por el micelio de hongos descomponedores de madera y residuos agroindustriales	Sebastián Rodríguez Jara	Exploración y experimentación de un nuevo material biobasado, y ensayos mecánicos con el fin de tener una perspectiva de cómo es el material y cómo se compara con otros materiales.	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Resistencia al agua por inmersión</td> </tr> <tr> <td>Prom.</td> <td>15.00%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Resistencia a la compresión</td> </tr> <tr> <td>Prom.</td> <td>1.21</td> </tr> </table>	Resistencia al agua por inmersión		Prom.	15.00%	Resistencia a la compresión		Prom.	1.21							
Resistencia al agua por inmersión																			
Prom.	15.00%																		
Resistencia a la compresión																			
Prom.	1.21																		
2018	Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials	Yangang Xing, Matthew Brewer, Hoda El-Gharabawy, Gareth Griffith, y Phil Jones.	Producir materiales de micelio que puedan utilizarse como aislantes, pero con un mayor nivel de biodegradabilidad, que los existentes en la actualidad.	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Rendimiento térmico.</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Conductividad / (mK)</td> <td>Capacidad calorífica específica MJ / (m³ * k)</td> </tr> <tr> <td><i>Oxyporus latermargi-natus</i></td> <td>0.078</td> <td>0.418</td> </tr> <tr> <td><i>Megasporo-poria minor</i></td> <td>0.079</td> <td>0.501</td> </tr> <tr> <td><i>Ganoderma resinaceum</i></td> <td>0.081</td> <td>0.369</td> </tr> </table>	Rendimiento térmico.				Conductividad / (mK)	Capacidad calorífica específica MJ / (m ³ * k)	<i>Oxyporus latermargi-natus</i>	0.078	0.418	<i>Megasporo-poria minor</i>	0.079	0.501	<i>Ganoderma resinaceum</i>	0.081	0.369
Rendimiento térmico.																			
	Conductividad / (mK)	Capacidad calorífica específica MJ / (m ³ * k)																	
<i>Oxyporus latermargi-natus</i>	0.078	0.418																	
<i>Megasporo-poria minor</i>	0.079	0.501																	
<i>Ganoderma resinaceum</i>	0.081	0.369																	
2019	Pioneering Construction Materials through Prototypical Research	Felix Heisel and Dirk E. Hebel	Activar estructuralmente el micelio.	A través de la "geometría funicular tiene la ventaja de que las tensiones son muy bajas. Se logró la estabilidad mediante la geometría, en lugar de la resistencia del material", se produjo una segunda estructura de carga para el Futurium en Berlín en 2019. Aquí, fue posible aumentar la resistencia a la compresión de los elementos de construcción unidos por micelio individuales significativamente".															
2020	Development of an extrudable paste to build mycelium-	Eugene Soh, Zhi Yong Chew, Naza-	Determinar las condiciones óptimas de crecimiento del micelio, así como la alta rigidez mecánica	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Ensayos mecánicos probetas</td> </tr> <tr> <td>Ancho: 1cm</td> <td>Largo: 4 cm</td> <td>Altura: 0.5 cm.</td> </tr> </table>	Ensayos mecánicos probetas			Ancho: 1cm	Largo: 4 cm	Altura: 0.5 cm.									
Ensayos mecánicos probetas																			
Ancho: 1cm	Largo: 4 cm	Altura: 0.5 cm.																	

bound composites	nin Saeidi, Alireza Javadian, Dirk Hebel, Hortense Le Ferrand	Pruebas de tracción: Se utilizó una celda de carga de 50 N, una velocidad de deformación de 0,5 mm / min y empuñaduras Bionix de 100 N. <hr/> Ensayos de compresión: Con una celda de carga de 500 N y una velocidad de carga de 3 mm / min. Todas las pruebas se repitieron por triplicado.
-------------------------	--	---

Nota: Todos los resultados mostrados en la siguiente tabla fueron tomados directamente de los artículos con la finalidad de evitar juicios de valor.

Tabla 1: Resumen de las publicaciones más relevantes que se han encontrado hasta el momento, respecto al uso del micelio en la construcción.



MARCO CONCEPTUAL

Definición de material compuesto

El término de material compuesto, se aplica a aquellos materiales que resultan de la combinación de dos o más componentes que se encuentran combinados a nivel macroscópico, y cuyo comportamiento mecánico y propiedades son superiores a la de los materiales que lo constituyen cuando actúan independientemente.

Donald Askeland⁷ define lo siguiente para los materiales compuestos: Se forman a partir de dos o más materiales produciendo propiedades que no se encuentran en ningún material sencillo...Con los compuestos se pueden producir materiales ligeros, resistentes, dúctiles y resistentes a las temperaturas o pueden producirse herramientas de corte rígidas, pero resistentes al impacto que de otra manera se romperían (Askeland 2012).

Un material compuesto se puede definir como una combinación de dos o más materiales que da como resultado, mejores propiedades que las de los componentes individuales usados solos. A diferencia de las aleaciones metálicas, cada material conserva sus propiedades químicas, físicas y mecánicas independientes. Los dos componentes son un refuerzo y una matriz. Las principales ventajas de los materiales compuestos son su alta resistencia y rigidez, combinadas con una baja densidad, en comparación con los materiales a granel, lo que permite una reducción de peso en la pieza terminada (Campbell 2010).

El termino composición se refiere a la constitución química de un material. Por su parte, el vocablo estructura se remite a la descripción del arreglo de los átomos, es decir, como se observa a diferentes niveles de detalle (Askeland 2012).

Concepción del “bio”

Es importante mencionar que la concepción de “Bio” ha ganado popularidad por una estrategia mercadotécnica específicamente que busca convencer al comprador de que hará un buen gesto ecológico al consumir el producto cuando realmente puede ser que el objeto no esté contribuyendo al medio ambiente. Sin embargo, también ha sido utilizado para describir conceptos nuevos cuyo principal enfoque es centrarse en formas, medios, procesos y soluciones que brinda la naturaleza o una relación directa con la misma (Martínez González 2020).

Definición de biopolímero

Para entender mejor este término, como se ha mencionado anteriormente, los biopolímeros provienen de la clasificación de los bioplásticos.

Los biopolímeros son definidos como “variedad de macromoléculas, producidas por sistemas biológicos, como animales, plantas o microorganismos”. Estos pueden ser sintetizados químicamente, sin embargo, como requisito fundamental sus unidades poliméricas deben ser derivadas de sistemas biológicos (Ochoa y Domínguez s/f).

En términos químicos también se trata de macromoléculas que forman parte de organismos vivos. Un

⁷ Donald R. Askeland es profesor emérito distinguido de ingeniería metalúrgica en la University of Missouri-Rolla. Su enseñanza e investigación estaban dirigidas principalmente a la fundición y adhesión de metales, en particular la fundición de espuma perdida, lo cual dio por resultado más de 50 publicaciones y numerosos reconocimientos por servicio y mejores artículos de la American Foundry Society.

ejemplo muy utilizado anteriormente, fue el celofán, el cual era hecho a base de celulosa, así como los antiguos rollos de películas de cine la cual era sumamente inflamable, así como el papel, ambos de origen vegetal (Martínez González 2020).

Definición de biomateriales

Para llegar a la definición de biomaterial cabe mencionar que existen otros términos con los que se suele confundirse, entre los que se encuentran son: materiales biológicos, materiales bio-basados y materiales biomiméticos.

Los biomateriales se definen por la European Society for Biomaterials⁸ como “materiales cuya intención es tender interfaces con sistemas biológicos para evaluar, tratar, aumentar o reemplazar cualquier tejido, órgano o función del cuerpo”.

Los materiales biológicos se producen por criaturas vivientes e incluyen huesos, sangre, músculos y una serie de otros materiales que sirven para muchas funciones diferentes. Los materiales bio-basados no cumplen una función para un organismo, pero son materiales derivados de tejido viviente como fécula de maíz o polímeros hechos de aceite de soya. Los materiales biomiméticos no son producidos por organismos vivientes, pero son química y físicamente similares a los materiales que si lo son. Como tal, encuentran su uso como reemplazos para materiales biológicos (Newell 2011).

Definición de biocompuesto

Un bio-compuesto es un material polimérico fabricado a partir de materias primas naturales que son procesadas por organismos vivos (hongos, bacterias o algas), ofreciendo ventajas para el medio ambiente dado que es biodegradable, y por lo que supone, es menor su grado de contaminación en su proceso de producción (Ramos Riascos y Caro Vives 2014).

Para los fines de esta investigación se utilizará el término biocompuesto para el prototipo que se pretende obtener.

Definición de micelio



Ilustración 1: Estructura de un hongo. Fuente Rodríguez Jara, S. (2016).

Para definir el micelio tenemos que hablar del reino fungí que es el tercer gran reino de vida, junto a los reinos animalia y reino plantae. Los hongos son los grandes recicladores de la naturaleza, descomponen residuos vegetales y animales dejando los nutrientes resultantes al servicio del crecimiento de nuevas plantas, de animales e incluso permiten el desarrollo de la vida humana.

⁸ <https://www.esbiomaterials.eu/>



Ilustración 2: Detalle del micelio que constituye el cuerpo vegetativo de un hongo. Fuente <http://www.bibliotecario.org/2020/03/labiblioteca-como-micelio-el-encanto.html>.

El micelio es un conjunto de hifas en un hongo que actúa como agente de eliminación y reciclaje de basura, pueden crecer en pan viejo o en vegetales podridos y parecer telarañas mezcladas en un solo lugar, tienen hilos de color blanco o crema con fibras largas llamadas Hifas. Es una estructura vegetativa que es parte de los hongos que normalmente crece en suelos y materia orgánica (Anón s/f-b).

Los hongos generan asociaciones en las raíces a través del micelio lo que permite que plantas y árboles se interco-

necten y formen asociaciones mutuas que mejoran la absorción del agua y los nutrientes. Además, realizan otras tareas útiles en beneficio del ecosistema. En forma de líquenes (hongos asociados con algas), trabajan en conjuntos rompiendo la superficie de las rocas, formando nuevos suelos y uniendo partículas para prevenir la erosión. Otro beneficio de los hongos es que producen sustancias químicas que permiten el desarrollo de antibióticos en el área de la medicina, de hecho, la penicilina es un desarrollo derivado del estudio de la micología (Rodríguez Jara 2016).

Los hongos están compuestos por filamentos (hifas), que son células que en algunas especies forman una red que se define como micelio que permanece sobre el sustrato adecuado todo el año, el micelio es el cuerpo principal del hongo y las hifas lo componen.

Al alimentar directamente con nutrientes y compuestos en dichos elementos, los hongos se desarrollan en una intrincada red de filamentos -el llamado micelio-, que actúa tanto como aglutinante natural y como un material puro para la creación de materia, algunos proyectos difieren en los ingredientes y en las condiciones de crecimiento, pero el proceso en términos generales es el mismo (Ochoa y Domínguez s/f).

Los materiales ligados al micelio son compuestos elaborados con un organismo vivo, un hongo, que crece sobre un sustrato rico en nutrientes, típicamente a base de plantas, como paja, aserrín, algodón, etc (Soh et al., 2020a).

Definición de lignina, celulosa y hemicelulosa

La madera está formada por tres polímeros, la celulosa: es un polímero natural formado por unidades de glucosa. La Hemicelulosa forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos del vegetal. Y finalmente la Lignina, sustancia química difícil de degradar, cuya función es dar rigidez y brindar protección contra el ataque de los microorganismos.

La lignina es una fibra polimérica con complejos aromáticos. Su resistencia le permite proteger el interior de la célula de las enzimas destructivas de algunos microorganismos y le ofrece rigidez al tallo de la planta (López Oliva s/f).

Definición de compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico (que tiene lugar ante la presencia del oxígeno), controlado por el ser humano, conduce a la producción de una mezcla de materia orgánica, que a su vez se convierte en fertilizante, rico en sustancias orgánicas y microorganismos útiles para el suelo, (nutrientes) además mejora la estructura del terreno.

El composteo consiste en una descomposición microbiana cuyo producto es un humus⁹ comúnmente conocido como composta o compost. En general, las características químicas y físicas de la composta varían de acuerdo con el material utilizado para fabricarla, las condiciones de operación y el grado de descomposición obtenido. Algunas de las propiedades que distinguen a la composta de otros materiales orgánicos son: color que va del café medio al café muy oscuro, bajo contenido de C/N (relación carbono/nitrógeno), cambio continuo en sus propiedades físicas debido a la actividad microbiana y alta capacidad de absorción de agua (Ruiz, Pastor, y Acevedo 2013).

⁹ Término usado para describir el material removido que se transforma de forma pasiva bajo tierra de sistemas como la fosa alterna. El humus tiene una composición ligeramente distinta a la composta. Ambos productos pueden ser usados como acondicionador del suelo.



MARCO HISTÓRICO

La evolución de la humanidad siempre ha estado condicionada por el descubrimiento de nuevos materiales.

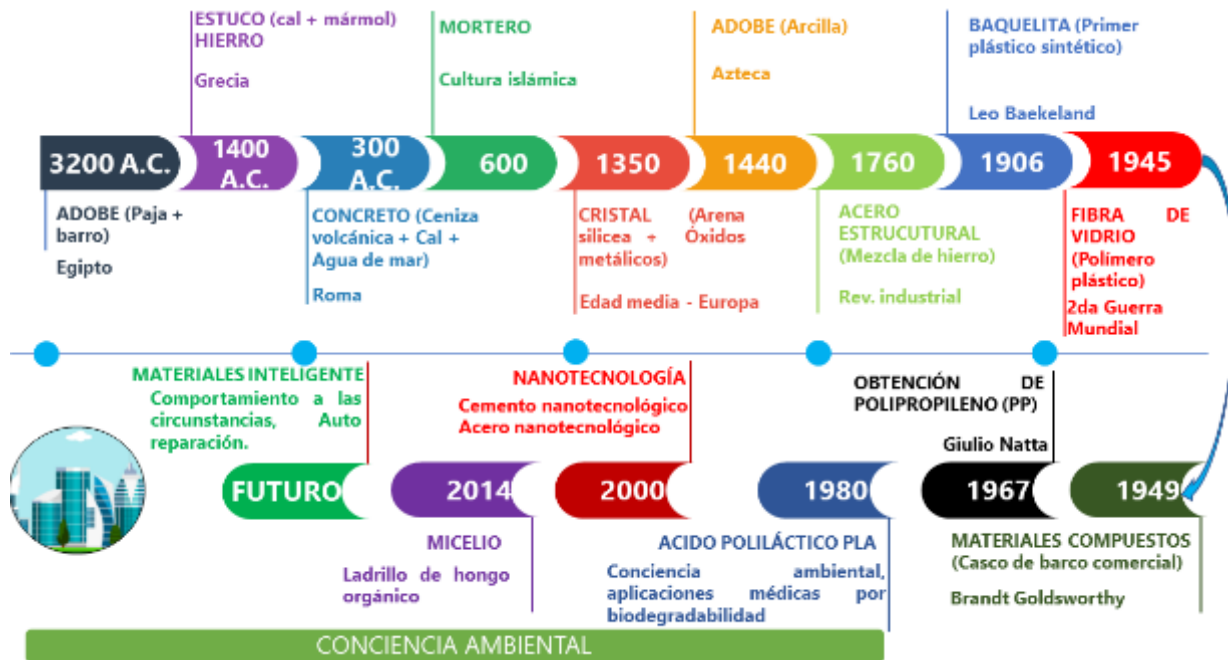


Ilustración 3. Evolución a través del tiempo de los materiales compuestos. Fuente: elaboración propia.

En este capítulo se analizará, a través del tiempo con un enfoque evolucionista y crítico, la historia de los materiales compuestos, que han sido desarrollados por las distintas civilizaciones de la antigüedad hasta nuestra actualidad, simultáneamente el impacto que han tenido con el medio ambiente.

El análisis se centra en la evidencia evolutiva de los materiales compuestos, con dos puntos de quiebre muy importantes desde la perspectiva y fines de esta investigación. Para empezar, desde la antigüedad se fabricaban materiales compuestos que mantenían cierta armonía con el medio ambiente, para la obtención de estos se utilizaban los recursos disponibles en la región, se debe agregar que la mayoría de estos materiales se obtenía con la fuerza humana, lo dicho anteriormente de forma general eran factores importantes que ayudaban a mantener armonía con el medio ambiente. Por otra parte todo esto cambiaría a partir de la revolución industrial, para efecto y análisis de esta investigación esto se denominaría como el primer punto de quiebre, que en contraste con lo anterior, cambiaría radicalmente la forma de producir y utilizar los materiales, a finales del siglo XX llegaría el segundo punto de quiebre, donde la humanidad se da cuenta que los recursos se están agotando, por ende estamos contaminando el planeta, a partir de esto se empiezan a tomar muchas alternativas para el desarrollo e implementación de nuevos materiales para la construcción bajo un enfoque de economía circular.

Debido a los impactos del desarrollo económico basado en el sobreconsumo de los recursos y el uso de los sistemas naturales como un recipiente de desperdicios, que afecta la viabilidad de los recursos renovables y los no renovables y con el fin de darle una solución a este problema, se han propuesto distintas formas de abordarlo (Wechsler 2018).

El desarrollo e implementación de los materiales compuestos ha cambiado la forma de vida del ser humano, al facilitar y hacer más eficiente la producción de objetos de la vida diaria, que van desde un zapato, celulares, automóviles, etc. Una de las ventajas de la aplicación de estos materiales en la Arquitectura, es que la mayoría ya han sido probados en otras disciplinas; un ejemplo, es el desarrollo de materiales compuestos de fibra de carbono inicialmente en la industria aeroespacial, que pasó a la aeronáutica, a la industria automotriz, deportiva y finalmente observamos ejemplos notables de su aplicación en la Arquitectura (Díaz García 2019).

Las personas nos vemos inmersas en un universo fabricado a partir de materiales de naturaleza metálica, polimérica, cerámica y todas sus posibles combinaciones. Estos materiales sustentan nuestro presente bienestar y hacen factibles nuestro progreso futuro. Han sido tan importantes los materiales en la vida del hombre que los historiadores han clasificado las primeras edades de la humanidad, según los materiales utilizados; así han surgido las edades de la Piedra, del Bronce y del Hierro (Mijangos y Moya 2017).

Los materiales compuestos en la antigüedad

La evolución de la humanidad siempre ha estado condicionada por el descubrimiento de nuevos materiales, la idea de un material compuesto no es nueva, el hombre, desde sus orígenes, ha recurrido a la combinación de diversos materiales para obtener propiedades específicas en ellos, optimizando de esta manera su uso, durante las edades de piedra, cobre, bronce, hierro, constituyeron etapas en las cuales el hombre, a través del conocimiento y manejo de nuevos materiales y técnicas desarrolló nuevas estructuras políticas y sociales.

Al contrario de lo que se pudiera pensar, el concepto de material compuesto es tan antiguo como la naturaleza misma. Un buen ejemplo de ello lo podemos observar en la madera, la cual combina fibras de celulosa de estructura tubular con una matriz de lignina (Vallejos et al. 2006).

Las antiguas civilizaciones tales como la egipcia, griega, romana, azteca, etc. sumaron nuevos conocimientos referentes a los materiales y la construcción sobre los cuales se ha fundado parte del conocimiento de la arquitectura y la ingeniería moderna.

Los materiales compuestos tienen una larga historia de aplicaciones, en el transcurso de la historia como se ha mencionado se tienen referencias de materiales compuestos; por ejemplo, el adobe compuesto de paja y barro realizado por la civilización egipcia, la griega desarrolló el estuco a base de cal y mármol, la romana hizo lo propio con el concreto compuesto de ceniza volcánica, cal y agua de mar que hasta el momento es uno de los concretos más resistentes a las sales, esto sentó las bases de las construcciones actuales, cabe señalar que se siguen empleando muchos de estos materiales milenarios en las construcciones actuales.

Como se ha mencionado anteriormente estos materiales mantenían cierta armonía con el medio ambiente, producto de eso, ahora vemos grandes centros arqueológicos en abandono en donde la naturaleza lo ha devorado por completo, de igual forma al ser productos locales no alteraban el contexto inmediato, al contrario, una vez en desuso o falta de mantenimiento se reintegraban nuevamente a la naturaleza.

Estos materiales irían cambiando conforme al paso del tiempo, por medio de la observación, se descubrió que las propiedades de un material podían ser alteradas por tratamientos de calor o por la adición de otras sustancias. A partir de esto, el proceso de selección de un material se definía por sus propiedades “apropiadas”, es decir, aquellas características del material que más se ajustaban a su uso futuro. Hasta hace poco, se logró comprender que las propiedades de un material se definían

directamente por su composición química, su microestructura y su procesamiento de manufactura (Díaz García s/f).

La revolución industrial – primer punto de quiebre

La revolución industrial que inició en Inglaterra a fines del siglo XVII, donde los bienes manufacturados pasaron de ser producidos de manera manual en talleres o pequeñas unidades productivas, a ser fabricados por máquinas en grandes fábricas.

Desde esta época empezaría el tipo de consumo que actualmente suele confundirse como algo moderno, dicho de mejor manera el consumo conspicuo¹⁰, lo que representa como signo o lo que entonces se denominaba lujo, es decir, la búsqueda de mayores niveles de confort, de la misma manera la obsolescencia programada¹¹, trajeron como consecuencia una mayor demanda para ventas masivas de productos, a su vez, conllevó a las grandes industrias a producir de manera más fácil con menos costo económico y una de las formas de hacerlo es a través del combustible fósil que al paso del tiempo está cobrando factura al medio ambiente.

Durante la revolución industrial se produjo un crecimiento veloz tanto en el desarrollo y producción de materiales que condicionó en mayor o menor medida el desarrollo de las naciones productoras, ante esto llegaría el ferrocarril, desarrollo que demandaría nuevos materiales y métodos de obtención como el hierro, el acero y el carbón.

La sustitución del carbón vegetal por el mineral permitió obtener hierro fundido en grandes cantidades; duro, inflexible y resistente a la compresión, por estas propiedades se aplicó en demasía para la construcción de máquinas y para la arquitectura.

La tecnología de esta época siguió avanzando y no paró de desarrollarse: el hierro forjado alcanzó excepcional relevancia cuando se inventó el laminador universal¹² y se pudieron fabricar grandes vigas con esto aceleraría el proceso de construcción y los edificios serían cada vez más altos.

¹⁰ El **Consumo Conspicuo** es precisamente ese en el que las personas consumen movidos por el interés de reflejar su alcance social. Al adquirir estos productos un individuo puede mostrar al resto del mundo su alto status. Podríamos decir que el sentido de estas compras, lejos de ser la satisfacción de lo adquirido, es netamente presuncioso. El origen del concepto de consumo conspicuo fue tesis de estudio de Thorstein Veblen (1857-1929) en su libro *Theory of the Leisure Class*. Dicho economista estableció su similitud con las formas de consumos de los antiguos jefes de tribus. Estos individuos portaban coronas, collares o capas, que les permitían distinguirse del resto, y con ello, mostraban la diferencia de posición social. En la actualidad esta forma de consumo es fácilmente identificable. Está marcado por la adquisición de bienes o servicios que ayudan a colocar a sus adquiridores en un alto puesto de la jerarquía social. En dicha lista de productos podemos encontrar lujosas mansiones, autos de carreras, asistencia a clubes selectos, ropa de alta costura y mucho más, un sinnúmero de productos o servicios a los que muy pocos pueden acceder debido a sus altos costos.

¹¹ La obsolescencia programada es la acción intencional que hacen los fabricantes para que los productos dejen de servir en un tiempo determinado: celulares, computadoras, tabletas, impresoras, lavadoras, secadoras de cabello, microondas, refrigeradores y pantallas, son aparatos casi indispensables para la vida diaria que fallan frecuentemente a mediano plazo y sin razón aparente. En ocasiones es demasiado caro repararlos, otras veces es imposible encontrar la pieza de repuesto o fueron diseñados para no ser desmontados. Esto ocurre porque los fabricantes calculan y planifican el tiempo de vida de sus productos, con el objetivo de reducir deliberadamente su utilidad y con ello incitar a las personas a comprar uno nuevo. Los fabricantes utilizan diferentes tipos de obsolescencias para programar la muerte de sus productos: a veces son fallas irreparables o inexplicables, o sacan al mercado versiones nuevas de los equipos incitando a nuevas compras para estar a la moda.

¹² Máquina utilizada para convertir los metales en planchas.

El hierro se empleó prácticamente en todas las edificaciones de aquella época desde el trazado de grandes arcos o en las estructuras adinteladas; en ambos casos se lograba gran limpieza espacial, puentes, viaductos, andenes, invernaderos, galerías cubiertas, fábricas, mercados o almacenes comerciales fueron algunas de las principales edificaciones construidas por el auge de este material, su uso se extendería a tipologías menores como quioscos y mobiliario urbano.

Inglaterra se adelantó en la aplicación del hierro, iniciándola con los puentes, en 1775 el hierro fundido sirvió para levantar el de Coalbrookdale¹³ con un solo arco y Thomas Telford fue un importantísimo ingeniero, autor de numerosos de ellos, varios en hierro, las estaciones de ferrocarril son otra de las tipologías fundamentales, junto a invernaderos y mercados, de la arquitectura del hierro, tras unos primeros años en que fueron levantadas normalmente con madera, cuando se sustituyeron por otras más sólidas, el hierro entró de lleno a formar parte de ellas y la cubierta de los andenes fue su expresión tecnológica más evidente, junto al edificio de viajeros.

El desarrollo de otro material compuesto que sería el vidrio y el cristal fusionado a altas temperaturas, una mezcla de arena y carbonato sódico o potásico a la que se le añaden pequeñas cantidades de carbonato cálcico, magnesio, aluminio y otros cuerpos, se obtiene una sustancia mineral: el vidrio.

Al cristal se le conoce por su nombre desde el siglo XV por ser lo más transparente de la industria del vidrio, que se forma por vidrio potásico y cal, desde entonces, y hasta el siglo XIX, se empleó únicamente cerrando vanos, pero poco a poco los muros se iban liberando, los distintos nuevos materiales facilitaron el cerramiento total con el cristal, una vez más los procesos industriales influyen en el desarrollo de las nuevas construcciones, surgiendo así los invernaderos de cristal, ejemplos perfectos de lo que se entendía en el momento como lo higiénico.

Ya en el gótico los templos cerraban sus muros con vidrieras, a tal punto que la La Sainte-Chapelle de París era sinónimo de caja de cristal, donde la luz era la vida, el símbolo, en el siglo XIX la expresión arquitectónica estaba conformado y cerrando todo con cristal, sostenido por el hierro.

El hierro colado como precursor del acero, tenía unas prestaciones y comportamiento limitados, no podía ser soldado, de baja resistencia a tracción, sus soluciones constructivas, en encuentros y uniones se asemejaban a las propias de la madera, las cuales fueron avanzando hacia soluciones de tipo roblón¹⁴ o remache tanto para la conexión entre piezas y elementos como para la consecución de nuevas y mayores secciones.

Si el hierro fundido es el rey en la primera mitad del siglo XIX, el acero lo destrona en la segunda, resultado de una combinación de hierro junto al carbono, forjado por su resistencia y elasticidad, además de poder producirse en grandes cantidades más aún con buena calidad, este material trabaja a flexión y resiste como si fuera a compresión, no hay límites para construir cualquier estructura, ya sea vertical u horizontal, teniendo así los rascacielos y todo tipo de edificios públicos, ayuntamientos, museos, etc. queda claro que con el acero se puede construir cualquier estructura, ya que se comporta sin problema a todo tipo de tensiones, además de poder combinar con cualquier material, esto nuevamente cambiaría el panorama y crecimiento de las grandes ciudades, sin embargo, desde la aparición de estos materiales hasta la generalización de su uso transcurriría mucho tiempo.

Otro ejemplo de material compuesto es el concreto armado, desarrollado a mitad del siglo XVIII, no está de más mencionar que se sigue empleando hasta nuestra actualidad en más del 80% de las

¹³ El puente Shropshire sobre el río Severn, en Coalbridge, Gran Bretaña, no es el primer puente construido en hierro, pero es considerada la primera estructura mayor construida enteramente en hierro.

¹⁴ Elemento de fijación que se emplea la unión de piezas.

construcciones. Resultado de la calcinación, hasta el punto de fusión de mezclas dosificadas a base de caliza y arcilla con producción del Clinker¹⁵, es decir, un compuesto vitrificado de silicatos, aluminatos, ferritos, cal, magnesia, son cementos conocidos como Portland, pues es en la ciudad inglesa donde por primera vez se prepararon en 1824.

El concreto formado por la inclusión de armaduras metálicas, se diseña partiendo de una base de adherencia entre el acero y el concreto, es decir, el concreto trabaja a compresión y el acero a tracción, la combinación perfecta para los grandes rascacielos y con la invención del ascensor eléctrico, se crean las múltiples viviendas dentro de un mismo edificio, todo se comienza a producir en masa, incluso los hogares, así se ha ido viendo a lo largo del siglo XX.

La segunda guerra mundial

Durante la primera y segunda Guerra Mundial, se emprendió la búsqueda de materiales alternativos a los frecuentemente utilizados como metales, cerámicos, entre otros, como el caso de proyectos de investigación a cargo de entidades militares. En los primeros años del siglo XX, entre 1916 y 1925, la industria del concreto y su aplicación en la construcción, a pesar de estar en continua evolución, se encuentra consolidada en el mundo industrializado de Europa y América, por sus altas prestaciones.

A lo largo del primer tercio de siglo continuaron desarrollándose sistemas constructivos basados en la prefabricación de elementos fundamentalmente de fachada más no estructurales.

Más adelante llegaría el inicio del concreto pretensado, en 1928, cuando Eugene Freyssinet¹⁶ establece la teoría del concreto pretensado en su publicación. Este gran invento revolucionaría la construcción con concreto, que entonces era un material inerte, pasivo, de fácil degradación a través de las inevitables fisuras, dada su baja capacidad de resistir esfuerzos a tracción.

El concreto se convierte, gracias al pretensado, en un material activo, que trabaja principalmente a compresión, lo cual le daría el carácter de isótropo. Para ello fue necesario el desarrollo de aceros de alto límite elástico y concreto de grandes resistencias a compresión.

La técnica del pretensado sigue un desarrollo en cuanto su técnica y conocimiento, paralela a la del concreto armado, pero será a partir de 1945 aproximadamente ante la escasez de acero en Europa durante la segunda guerra mundial cuando se encuentra la aplicación del concreto pretensado motivada por una alta demanda ya que se necesita menores cuantías ante unas mismas sollicitaciones respecto del concreto armado.

Ante la inminente reducción de mano de obra, escaseo de materiales por la guerra, empezaría una serie de implementación de materiales compuestos, con esto empezaría la era del plástico, por ende la dependencia del combustible fósil, vendrían las aplicaciones armamentísticas y aeronáuticas, que darían origen a materiales como los laminados de aluminio reforzados con fibra de vidrio, la fibra de carbono, posteriormente, los polímeros reforzados, a partir de 1965, comienza realmente el desarrollo de toda una ciencia de los materiales compuestos que establecen nuevos criterios de resistencia, elasticidad, flexibilidad o compresión, entre otros, y que no ha parado su desarrollo hasta hoy día.

Los primeros materiales compuestos que aparecieron durante la Segunda Guerra Mundial. Se trata de

¹⁵ El clinker es un producto con forma de gránulos o pequeñas bolas, de entre 5 y 25 mm aproximadamente, que se forma a partir de la calcinación de caliza y arcilla a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450°C. Estos gránulos triturados y mezclados con diferentes aditivos permiten fabricar los distintos tipos de cemento y posteriormente concreto.

¹⁶ Ingeniero francés. Ideó un modo de endurecer el concreto armado que denominó "concreto pretensado".

materiales heterogéneos, constituidos por una matriz plástica orgánica (polímero) asociada con un refuerzo fibroso, por lo general de vidrio o de carbono. Son termoestables o termoplásticos y su historia se remonta, según los casos, a menos de cincuenta años o apenas una década. Pero ya se han desarrollado más de una docena de procedimientos de aplicación, lo cual es mucho más que las grandes técnicas de transformación de metales desde hace doscientos años: fundición, sinterización, forja, embutición, soldadura (Wechsler 2018).

La era del plástico

La era moderna de los compuestos comenzó cuando los científicos desarrollaron plásticos, hasta entonces, las resinas naturales derivadas de plantas y animales eran la única fuente de aglutinantes, desde hace más de cincuenta años la industria de los plásticos ha proliferado a costa del combustible fósil, al grado de que ha superado a la industria del acero.

Los polímeros a base de combustible fósil han entrado en nuestras vidas y palabras como poliestireno, polietileno, cloruro de polivinilo, poliamidas, PET, etc. se nos han hecho más y más familiares, se han ido incorporando a tal grado que sirven para vestir, envasar o jugar. Ha sido un fenómeno de tal envergadura que nunca en la historia de la humanidad se ha registrado un descubrimiento de desarrollo tan rápido y en proporciones tan inimaginables, se desarrollaron plásticos como vinilo, poliestireno, fenólico y poliéster, estos nuevos materiales sintéticos superaron a las resinas individuales derivadas de la naturaleza, por su bajo costo de producción masiva.

El vulcanizado: el primer polimérico del que se tiene noticia fue producido por Charles Goodyear en el año 1839 Goodyear consiguió modificar las propiedades mecánicas de la goma natural, extraída del jébe¹⁷ mezclándola con azufre y calentándola, esta mezcla consiguió que el caucho obtenido se mantenía seco y flexible a cualquier temperatura, cuando antes en las épocas de calor, se reblandecía y quedaba pegajoso.

Alexander Parkes estudiando el nitrato de celulosa en 1845 Parkes obtiene un nuevo material que podía ser utilizado en su estado sólido, plástico o fluido, que se presentaba en rígido como el marfil, opaco, flexible, resistente al agua, coloreable y era posible trabajarlo con un utensilio como los metales, estampar por compresión, laminar Parkes llamó a este material Parkesina, lo patentó y, aunque no tuvo mucho éxito comercial debido a su elevado costo de producción, representó un paso definitivo en lo que se puede considerar la materia plástica primogénita de la que se ha desarrollado una gran familia de polímeros que se conoce hoy en día.

El celuloide: en 1868 ante la escases del marfil la empresa Phetan and Collander originaria de Estados Unidos productora de bolas de billar, prometió un premio de \$10.000.00 dólares a quien pudiera desarrollar un producto capaz de sustituir al marfil en la fabricación de las bolas. John W. Hyatt se puso a investigar en este campo y alrededor de 1868 mejoró el producto desarrollado por Parkes y consiguió un producto económicamente viable sustituyendo el aceite de ricino, que usó Parkes, por el alcanfor, a este producto se le denominó celuloide y las bolas de billar que se produjeron pueden considerarse como el primer producto fabricado en material plástico, el celuloide fue patentado en 1870.

El celuloide fue usado durante mucho tiempo en la fabricación de una diversidad de productos:

¹⁷ También conocido como árbol de caucho es una planta perteneciente a la familia de las euforbiáceas. El *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. se caracteriza por ser el principal material para la creación de los cauchos y es común encontrarlo en lugares del trópico, actualmente su cultivo se da en Hawái.

peines, mangos de cubiertos, muñecos, dentaduras, soportes de lentes, bolas de ping pong y películas fotográficas, no obstante, poco a poco se abandonó su producción debido al surgimiento de otros materiales poliméricos menos inflamables.

Posteriormente se descubriría el cloruro de polivinilo: fue E. Baumann, quien, en 1872, estudió el procedimiento de polimerización del cloruro de vinilo y poner la atención en la importancia del producto termoplástico que era posible obtener, sin embargo fue necesario esperar la profundización de los conocimientos sobre la síntesis del cloruro de vinilo debido al mecanismo de polimerización que realizó el químico ruso Ivanovic Ostromislenski (1880-1939), antes de poder empezar con la producción industrial de los polímeros vinílicos.

En 1927 la estadounidense Union Carbide Chemicals produjo los primeros copolímeros cloruro-acetato de vinilo que solo fueron fabricados en escala industrial a partir del año 1939.

Los descubrimientos de la parkesina y del celuloide representaron el inicio de un nuevo material, pero las estructuras químicas de sus moléculas eran totalmente desconocidas. La primera hipótesis de la existencia de macromoléculas fue desarrollada en 1877 por Friedrich A. Kekulé, cuando advirtió la posibilidad de que estas sustancias orgánicas naturales podrían estar constituidas de moléculas muy grandes y tener propiedades especiales. En 1893, Emil Fisher, sugirió que la estructura de la celulosa natural podría estar formada por cadenas constituidas por unidades de glucosa, mientras que los polipéptidos serían grandes cadenas de poli aminoácidos asociadas.

En 1907, Leo H. Baekeland perfeccionó la resina de formaldehído que había sido desarrollada unos años antes por Adolf Von Bayer, la sustancia que obtuvo, una resina rígida y poco inflamable que denominó Baquelita fue el primer material polimérico sintético, a partir de su desarrollo se extendió la premisa de que es posible modificar las características de los materiales existentes y crear nuevos materiales, que pueden ser diseñados para funciones específicas, según lo requiera el usuario.

Entre 1930 y 1942 se descubrieron otros polímeros como el copolímero de estireno-butadieno (1930), los poliuretanos (1937), el poliestireno y el poli (tetraflúoro-etileno) (1938) o los poliésteres insaturados (1942), entre otros.

En 1938 se empezó a producir nylon por la empresa Dupont, por esta época en Alemania P. Shlack hizo la primera polimerización por abertura de anillo, de un compuesto orgánico cíclico, al producir el nylon a partir de la caprolactama.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la fabricación y comercialización de polímeros tuvo un gran impulso con la aparición de las resinas epoxi en 1947 y el ABS en 1948.

Década de los 50's: otro paso significativo en los estudios de la química de los polímeros ocurrió en 1953, con el descubrimiento de la polimerización estereo-regular¹⁸ por los investigadores Karl Ziegler y Giulio Natta, dicho sea de paso, recibieron el Premio Nobel de Química en 1963 por su descubrimiento. Esta década estuvo marcada por el nacimiento de nuevos polímeros como polietileno lineal, el polipropileno, el poliacetal, el policarbonato, el polióxido de felineo, así como de nuevos copolímeros.

Durante los años 60, los plásticos pasaron a sustituir muchos otros productos como la madera, el cartón o el vidrio en los embalajes.

¹⁸ También conocido como isotático, se refiere cuando todos los grupos fenilo se encuentran del mismo lado de la cadena, decimos que el polímero es isotático. Si los grupos fenilo aparecen alternadamente a ambos lados de la cadena, se dice que el polímero es sindiotático. Si los grupos fenilo están distribuidos al azar a izquierda y derecha, sin ningún ordenamiento particular, decimos que el polímero es atático.

En los años 70 los plásticos sustituyeron a algunas aleaciones ligeras, ocupando el lugar de algunos metales, surgen nuevos retos dentro del campo de los materiales, tales como la reducción de peso, el incremento de las propiedades de los materiales para las aeronáuticas y aeroespacial, la reducción del tamaño de los componentes de telecomunicación, la maximización de las capacidades de almacenamiento de información, el manejo y transmisión de datos, entre otros.

Durante los años 80 la producción de plásticos se intensificó y diversificó convirtiéndose en una de las principales industrias del mundo, se aumentaron las necesidades de estos materiales, así como de nuevos desarrollos, muchos centros de investigación en industrias como universidades mantuvieron y aumentaron la investigación en estos campos obteniendo constantemente desarrollos de polímeros con las más variadas propiedades químicas y físicas.

La historia del tecno polímero se desarrolla junto con el perfeccionamiento de las tecnologías de transformación que permiten convertir un puño de gránulos, un poco de polvo o un bote de líquido en un objeto terminado con una forma propia y capaz de cumplir una función precisa.

Esta época se caracteriza por el empleo de un inmenso rango de materiales, la evolución de las mismas es rápida, así como el rango de sus propiedades es muy variado, el avance de la transformación de los materiales junto con el ingenio aumentó los campos de aplicación y la concepción de los diseños.

Por otro lado, este elevado incremento en el conocimiento como producción de nuevos materiales ha dado lugar a un elevado consumo de todo tipo de materiales, lo que ha motivado en las últimas décadas una creciente preocupación de la sociedad por los problemas medioambientales que se derivan de los residuos generados por estos materiales una vez finalizada su vida útil.

En este sentido los polímeros sintéticos son motivo de serios problemas medioambientales, debido a su estabilidad química y microbiológica, que los hace resistentes a la degradación al final de su vida útil.

Los materiales poliméricos se producen desde hace más de un siglo, y el crecimiento de su consumo ha ido acompañado del desarrollo tecnológico, así como de nuevos materiales, en cambio, el desarrollo de procesos que permitan el reciclado de estos productos ha sido escaso teniendo en cuenta las exigencias de las políticas ambientales. No obstante, por ello, desde las últimas décadas se está prestando especial atención a aquellos estudios que tienen como fin sustituir dichos polímeros sintéticos por los polímeros procedentes de fuentes renovables y biodegradables.

Último cuarto del siglo XX – segundo punto de quiebre

Desde el celuloide: material sustitutivo de sustancias más nobles y apreciadas que se incendiaban como una cerilla y a veces explotaban, en más o menos cien años se han desarrollado otros polímeros de mucho mayor capacidad gracias al avance de la tecnología, en muchos aspectos superiores a los metales, a la cerámica junto a los materiales tradicionales, empleados en lo más avanzado de la tecnología moderna, sin embargo, por el gran problema medioambiental que han causado no podemos seguir dependiendo de ellos.

Debido a cuestiones medioambientales y de sostenibilidad, este siglo ha sido testigo de logros notables en tecnología ecológica en el campo de la ciencia de los materiales a través del desarrollo de biocomposites. El desarrollo de materiales de alto rendimiento a partir de recursos naturales está aumentando en todo el mundo (Faruk et al. 2012).

Con el fin de mejorar el rendimiento energético de los edificios, se utilizan cada vez más materiales aislantes (como vidrio mineral y lanas de roca o espumas plásticas a base de combustibles fósiles), lo

que puede generar problemas potenciales con el agotamiento de los materiales y la eliminación en vertederos. Una solución sostenible sugerida es el uso de materiales biodegradables de base biológica. Se han realizado varios intentos para desarrollar biomateriales, como madera de oveja, hemcreto¹⁹ o papeles reciclados (Xing et al. 2018).

El agotamiento de los recursos de petróleo junto a las crecientes regulaciones medioambientales, están actuando en conjunto para dar impulso a los nuevos materiales y productos que son compatibles con el medioambiente e independientes del combustible fósil, los avances recientes en ingeniería genética, el desarrollo de las fibras naturales, y la ciencia de los materiales compuestos ofrecen unas posibilidades significativas para nuevos materiales aunado a los procesos de fabricación mejorados a partir de recursos renovables, más aún que puedan ser biodegradables y reciclables, pero también que se obtengan de recursos sostenibles al mismo tiempo.

La elaboración de productos químicos y nuevos materiales a partir de recursos renovables adoptando la biomimesis no es una idea nueva. Anteriormente muchos de los productos químicos y materiales provenían de fuentes renovables hasta la primera parte del siglo XX. Sin embargo, el éxito y el tremendo crecimiento de la industria petroquímica en el siglo XX, la rápida y los bajos costos de producción fueron factores elementales que repercutieron para desacelerar el crecimiento de productos basados en materiales biológicos. Actualmente los factores medioambientales, económicos, como lo menciona el título de este capítulo al que se refiere como segundo punto de quiebre, para el desarrollo de nuevos materiales, están impulsando de nuevo hacia la tendencia a una mayor utilización de polímeros y materiales basados en materias primas biológicas, amigables con el medio ambiente, con la finalidad de impulsar hacia la sostenibilidad.

La investigación llevada a cabo a partir de 1990 hasta el presente ha llevado a muchos nuevos productos basados en materiales biológicos. Algunos ejemplos incluyen ácido poliláctico (PLA) del maíz, productos de poliuretano a partir de aceite de soya, adhesivos de proteína de soya, lubricantes a partir de aceites vegetales, polímeros termoestables y termoplásticos a partir de la soya y el maíz, ácidos orgánicos de recursos de cosechas, y biocomposites a partir de fibras lignocelulósicas combinadas con polímeros basados en el petróleo como el polipropileno (PP) y el polietileno (PE), o biopolímeros como el PLA, ésteres de celulosa, polihidroxialcanoatos, y bioresinas basadas en aceites vegetales (Cigarroa Espinosa 2017).

En las últimas décadas, las fibras de materiales lignocelulósicos provenientes de recursos renovables se han presentado en la industria de los materiales compuestos, como una alternativa a los materiales de refuerzo convencionales, y para los efectos de esta investigación se toma el micelio como una alternativa como aportación a nuevos materiales provenientes de la naturaleza, cabe recalcar que se inspira en la biomimesis para la solución y dependencia del combustible fósil.

¹⁹ Hemcreto es el nombre con el que la empresa Lhoist Group ha bautizado al nuevo concreto ecológico de cáñamo de baja emisión de CO² y mucho más resistente que el concreto convencional.

Visión sistémica del problema

“Cuanto más fuerte sea la tempestad y vigoroso el oleaje del mar, tanto más atento y seguro debe estar el timonel frente a los desafíos de las aguas por donde navega”

Idalberto Chiavenato

Planeación Estratégica

Hace alrededor de 2,500 años, Sun Tzu un general y filósofo chino, escribió un libro sobre el arte de la guerra que en nuestra actualidad sigue siendo admirado, en este libro señala la importancia de la preparación de planes, la guerra efectiva, la espada envainada, las maniobras, la variación de tácticas, el ejército en marcha, el terreno, los puntos fuertes y débiles del enemigo y la organización del ejército. Sun Tzu mencionaba que el orden y el desorden dependen totalmente de la organización, mientras que el valor y la cobardía de las circunstancias y la fuerza o la debilidad de la disposición.

En el entendido de la importancia que resulta una buena planeación, en este capítulo se aborda sobre ello, no obstante, existen muchos procesos que se realizan de manera improvisada, por llamarlo de alguna manera, obteniendo resultados exitosos, pero esto garantiza muy poco la probabilidad del triunfo, por lo tanto, es mejor la planeación, para resultados más óptimos.

La planeación estratégica es un proceso esencial en la organización que se encarga de trazar los objetivos por alcanzar y las directrices para definir los planes de acción para lograrlos y que generen sus ventajas competitivas y sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, esta solo alcanzará su máxima eficacia cuando todas las personas que la componen, como conjunto permanente y orquestado de esfuerzos de inteligencia colectiva, la acepten, la entiendan y la apliquen en la práctica (Chiavenato y Sapiro 2017).

Para comprender la naturaleza de la planeación, es una toma de decisión anticipada, un proceso de decidir las acciones y cómo van a realizarse antes de actuar o poner en marcha, esto es de suma importancia porque el futuro deseado implica un conjunto de decisiones.

Así, la planeación se interesa tanto por evitar las acciones incorrectas como por reducir los fracasos en aprovechar las oportunidades, es un proceso que supone la elaboración y la evaluación de cada parte de un conjunto interrelacionado de decisiones antes de que se inicie una acción, en una situación en la que se crea que a menos que se emprenda tal acción, no es probable que ocurra el estado futuro que se desea y que, si se adopta la acción apropiada, aumentará la probabilidad de obtener un resultado favorable (Hernández Miranda 2014).

A continuación, se describen los componentes para el funcionamiento del sistema.

Componente 1: Micelio

Determinar el micelio ideal bajo los parámetros de tiempo y condiciones de crecimiento (humedad, temperatura) con esto se quiere decir que se adapte perfectamente al clima local y crezca en un tiempo récord de tal manera que permita cumplir con los tiempos de la investigación.

Componente 2: Sustrato

El segundo componente, es un sustrato rico en lignina, celulosa y hemicelulosa, el cual deberá tener los nutrientes necesarios para la invasión exitosa del micelio.

Componente 3: Condiciones

Un ambiente controlado: oxígeno, humedad, luz, oscuridad, etc. son elementales para el crecimiento y desarrollo del micelio, así mismo esto evitará que se contagie de otros patógenos.

Componente 4: Estrategia

Encontrar la mezcla ideal micelio-sustrato, tiempo de crecimiento, para poder obtener resultados óptimos.

Componente 5: Caracterización

Los ensayos de laboratorio a las que se someterá el producto final bajo normas nacionales e internacionales para su funcionamiento.



Ilustración 4. Componentes del sistema. Fuente: elaboración propia.

Descripción del producto de investigación esperado

Explicación del Método Prospectivo para la Creación de Escenarios Futuros

Los escenarios son construidos como herramienta para pensar colectivamente en el futuro, apoyar la toma de decisiones y la elección de opciones que pueden ser viables en el futuro, orientadas por diferentes políticas (Chiavenato y Sapiro 2017).

Los escenarios futuros que se proyectaron para esta investigación se hicieron con una perspectiva global y holística, utilizando modelos de juicio, probabilidades subjetivas, opiniones profesionales, análisis de mercado con aplicaciones similares del producto esperado, etc. en general, este enfoque trata de un futuro múltiple e incierto con variaciones cualitativas, que actúan conforme lo determine la acción presente.

Escenarios futuros de la Aportación

Con lo anterior mencionado, se construyeron los siguientes escenarios futuros, los cuales no solo funcionan como una herramienta para conocer las distintas aplicaciones futuras en el medio, sino también ayudan a construir imágenes alternativas, sin dejar de ser una simple extrapolación²⁰ de las tendencias actuales. A continuación, se presentan los escenarios posibles siendo el primero la principal y el de enfoque para esta investigación.

Elemento aligerante en losa (casetón): podrá utilizarse en losas, reticulares, nervadas o en cimentaciones, en las cuales no tiene función estructural, ya que ésta la toma directamente del armado de las trabes en forma reticular o los capiteles, la malla electro soldada y la capa de compresión de concreto.

Aplicación en carreteras: como relleno en carreteras para evitar deformaciones y hundimientos con el paso del tiempo, la rapidez de que esto ocurra está directamente relacionada con la carga que incide sobre el suelo, caso similar a los anteriores, actualmente se emplea el poliestireno expandido, para reducir y disminuir la carga sobre el subsuelo, así como hundimientos.

Aplicación en puentes: de igual manera se utilizaría para relleno, con la finalidad de evitar riesgos de asentamientos diferenciales y disminuir la presión del terreno (fuerzas horizontales) sobre la estructura.

Molduras: pieza cortada para decoración en losas, las formas varían de acuerdo al diseño solicitado por el cliente y se obtienen dos piezas: la "contra" o molde y la moldura propiamente.

Empaque: como material de empaque para cajas de botellas de vino, o cualquier otro producto en donde se emplee el poliestireno con esta finalidad.

²⁰ Proceso de estimar más allá del intervalo de observación original, el valor de la variable con base en su relación con otra variable.

Infografía de Escenarios Posibles de Aportación

Los escenarios se concibieron de forma simultánea para desarrollar la percepción de diferentes posibilidades y alternativas, así como diferentes visiones de lo que se pretende alcanzar, para el producto final deseado, no está de más recordar que los escenarios que se presentan no son predicciones exactas del futuro, pero proveen una manera de pensar a través de las consecuencias de la estrategia de desarrollo.



Ilustración 5. Escenarios futuros. Fuente: elaboración propia.



**MÉTODO Y PLAN
DE TRABAJO**

“La naturaleza es un arquitecto mucho más inteligente que nosotros”

Carlo Ratti

El estudio es de carácter experimental, porque se manipularon intencionalmente variables independientes (micelio y sustrato), para analizar las consecuencias que estas tienen sobre las variables dependientes (propiedades biológicas, físicas y químicas del material).

El Proyecto cuenta con diferentes materiales e infraestructuras que aseguraron la viabilidad del mismo y que permitieron abordar el método propuesto con garantías de éxito. En primer lugar, como se ha visto, se hizo una investigación de carácter exploratorio por lo cual se evaluó el proceso de conformación y composición para la obtención exitosa del biocompuesto.

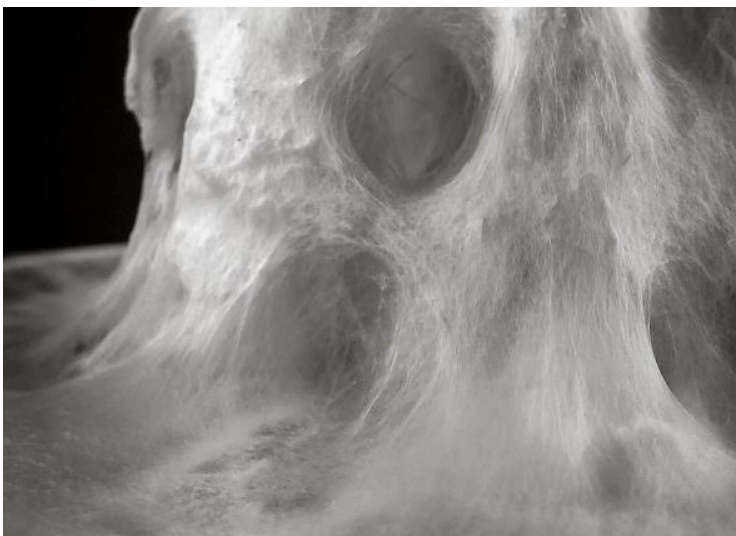


Ilustración 6. Reproducción de micelio en laboratorio. Fuente: <http://www.fungal-futures.com/>

El micelio fúngico es una red compleja de cadenas celulares fibrosas (hifas) microscópicas, entrelazadas y en forma de tubo, que comprende la parte vegetativa de los hongos saprofitos. Los hongos saprofitos se alimentan de materia orgánica muerta, por lo que tienen un papel fundamental como descomponedores en los ecosistemas.

El reino fungí pasa desapercibida ante nuestros ojos sobre todo la red de micelio que expanden bajo la tierra, pero están presentes por todas partes, en el aire, en el agua, en nuestro cuerpo, en los árboles, en el techo del baño, bajo tierra, en la fruta que se echó a perder en la cocina, en el refri, en la humedad de la regadera, etc.

En la naturaleza hablando del mundo animal se encuentran los carroñeros, animales encargados de consumir carne podrida, algo similar a estos, pero en el reino fungí: mucho más complejo e inteligente los hongos son los grandes recicladores de la naturaleza, a través de una red de millones y millones de hifas.

Producen enzimas que ayudan en la degradación de la materia orgánica, transformándola en minerales, el micelio tiene diferentes tamaños según el terreno, cuando crece en el bosque es grande en comparación con los diminutos que se encuentran en las casas, son de paredes celulares rígidas que les permiten moverse por el suelo para encontrar un entorno más protector, el micelio tiene una estructura en forma de árbol a niveles microscópicos, debajo de la superficie, los hongos desarrollan estructuras filiformes llamadas micelio: son filamentos blancos extremadamente delgados, que se desarrollan en todas direcciones, formando una red compleja que crece muy rápidamente, cuando el hongo se implanta en un lugar adecuado, el micelio se comporta como un pegamento, cementando el sustrato y transformándolo en un bloque sólido, este sustrato puede estar compuesto por aserrín, madera molida, paja, diversos residuos agrícolas, entre otros.

Durante su proceso de crecimiento, el micelio fúngico descompone la materia vegetal mientras

coloniza gradualmente el sustrato, cubriéndolo con una red tridimensional de micelio, actuando como fibra y como material de unión. Finalmente, cuando se seca, este complejo proporciona un biocompuesto natural. Teniendo en cuenta la tasa de crecimiento del micelio, sus requisitos de riego limitados, su capacidad para consumir y utilizar los desechos de las plantas y sus propiedades mecánicas y estéticas únicas, su implementación en las cadenas de valor industriales puede proporcionar una solución esencial para mejorar los patrones del ciclo de vida del futuro.

Dependiendo de la cepa del micelio y del sustrato utilizado, el producto final puede moldearse para producir variedad de productos tales como: muebles, accesorios, tejidos, materiales de embalaje e incluso ladrillos, investigaciones científicas han demostrado que el material cuenta con buenas características térmicas, acústicas e incluso buen comportamiento al fuego, en términos de características físicas y mecánicas, los materiales a base de micelio se parecen al poliestireno expandido, siendo la gran diferencia el tiempo de degradación y distintos ciclos de vida.

Los ejemplos del uso del micelio, en los artículos científicos que abordan sobre el tema casi siempre concluyen con una afirmación positiva: sobre el enorme potencial en las áreas más diversas, representando un cambio de paradigma en la forma en que abordamos la obtención, el uso y la eliminación de materiales de construcción aunque es necesario investigar y realizar experimentos con el material para que tenga eficiencia, competitividad y un control de calidad industrial para su uso masivo, y sobre todo encontrar un hongo local acorde a las necesidades de cada región del mundo.

Al ser 100% biodegradables, abundantes en el planeta y cultivados a partir de desechos, logrando excelentes características funcionales, los materiales a base de micelio tienen un enorme potencial aún sin explotar, pero, sobre todo, también sirven para demostrar que las grandes innovaciones no requieren necesariamente de nuevos materiales tecnológicos o complejos, que devoren los recursos finitos del planeta.

El cambio conceptual hacia el uso de hongos saprofitos para fabricar materiales de construcción se inició hace solo unos años. Aparentemente, la incubación de micelio de hongos con desechos vegetales produce materiales porosos biodegradables que se han sugerido como alternativas sostenibles para muchos materiales a base de petróleo (Attias et al. 2020).

Los compuestos ligados a micelio son materiales prometedores para envases, aislamiento, moda y arquitectura sostenibles (Soh et al., 2020a).

A través de la investigación de los potenciales ofrecidos por nuevas tecnologías de materiales, el proyecto que propone esta investigación se esfuerza por abrazar nuevas construcciones sostenibles y busca explorar lo positivo a través del reino fungí, esta propuesta prevé un futuro con materiales aligerantes naturales a través del micelio, explorando la idea de una arquitectura biodegradable.

Una revisión reciente analiza la utilización de hongos para fines industriales y muestra que, aunque los materiales de origen fúngico se utilizan ampliamente en productos industriales, el gran potencial biotecnológico de los hongos actualmente no se ha estudiado suficientemente.

Tipo de micelio seleccionado

Para la selección de micelio se consultaron varios libros de biología con la finalidad de determinar todas las subdivisiones, como también las características del micelio, así mismo, las condiciones de crecimiento para garantizar la obtención exitosa del material compuesto.

Se determinó que el micelio fuera de estructura filamentosa, pudrición blanca con esto quiero decir que degrade celulosa, hemicelulosa y lignina, como también crezca en zonas templadas (clima CDMX), humedad entre 30% y 40% y muy importante que no fuera venenoso. Los micelios seleccionados son de la clase *Agaricomycetes* del Reino Fungí, y se escogieron dos tipos de esta clase, *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum* cultivados como hongo comestible.

Las especies de hongos seleccionadas influyen significativamente en la colonización del micelio y las

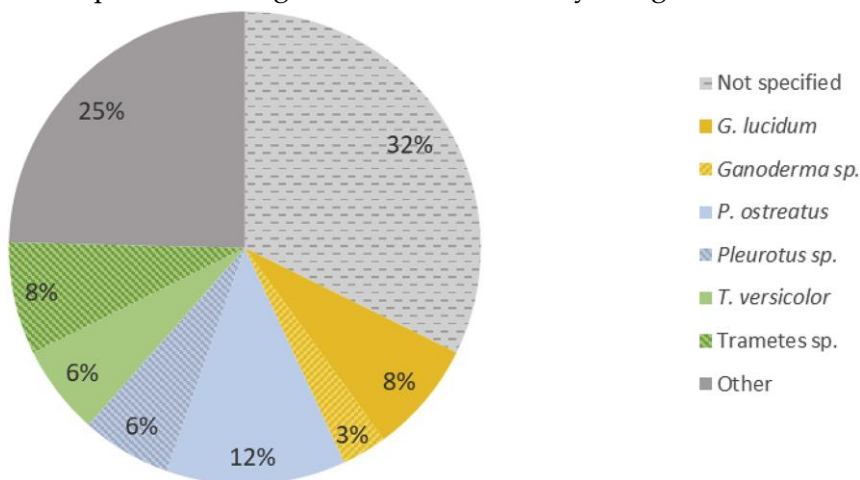


Ilustración 7. Principales especies de hongos utilizadas para la fabricación de compuestos de micelio según la literatura actual. Fuente: https://ars-els-cdn-com.pbidi.unam.mx:2443/content/image/1-s2.0-S0959652619339071-gr2_lrg.jpg.

propiedades físico-mecánicas del biocompuesto final. La tasa de colonización, el grosor de las hifas, la tendencia de ramificación y la topografía de la superficie varían según la especie fúngica seleccionada. Sin embargo, como se muestra en la ilustración 7 muchas publicaciones no indicaron las especies de hongos específicas utilizadas, probablemente por razones de propiedad intelectual. Pero también muestra que *Ganoderma lucidum* y *Pleurotus ostreatus* eran las más comunes.

Tipo de sustrato

Las mezclas de sustrato descritas en la literatura generalmente consisten en residuos de cultivos agrícolas molidos como algodón, maíz, trigo, cáñamo, kenaf y residuos de lino. Según (Attias et al. 2020) las mezclas de sustrato a menudo se enriquecen con carbohidratos y calcio para estimular el desarrollo y la unión del micelio, pero no se especifican los tipos de carbohidratos y calcio, la mayoría de los estudios utilizan plantas anuales o madera blanda.

A partir de la revisión bibliográfica en el cual indica las propiedades químicas de los materiales que devora el micelio; hemicelulosa, celulosa y lignina, se escoge trabajar con aserrín de pino y cartón, al contener los elementos antes mencionados, además el cartón junto al aserrín son desechados y se convierten en residuos sólidos urbanos por lo cual facilita su obtención y que mejor manera que aprovecharlos para darles un mejor uso.

Proceso de fabricación

Como se ha mencionado anteriormente, los detalles de los protocolos de los procesos de fabricación a menudo faltan en las publicaciones, lo que dificulta la reproducción de compuestos y experimentos.

La poca información que se encontró y proporciona estos detalles describe un proceso que general-

mente comienza con la esterilización de la mezcla de sustrato, inoculación e incubación con el micelio seleccionado, homogeneización y aplicación en un molde preformado. Unos pocos días adicionales de incubación permiten que el micelio se una a las partículas del sustrato, lo que da como resultado una malla tridimensional de un compuesto vivo, que comprende fibras de plantas y hongos interconectadas. El material fresco contiene aproximadamente un setenta por ciento de agua. A continuación, el objeto se retira del molde y se seca en el horno para detener el desarrollo del micelio. Durante el proceso de secado, el agua dentro de las células fúngicas se evapora, creando cavidades de aire microscópicas, así como reduciendo el tamaño original del material aproximadamente en un 15%.

Propiedades físico-mecánicas de compuestos de micelio

Según la literatura, las características generales de los compuestos de micelio se evalúan con frecuencia mediante un conjunto de pruebas físico-mecánicas, que incluyen la densidad del material seco, la resistencia a la compresión, la resistencia térmica, la resistencia a la flexión, la permeabilidad al vapor de agua, la absorción de agua y la estabilidad dimensional. Las características adicionales de los compuestos de micelio descritas en la literatura son las propiedades de aislamiento acústico y los beneficios antibacterianos.

Como no existe un estándar actual para la producción y caracterización de compuestos a base de micelio, las propiedades de los materiales se evalúan comúnmente de acuerdo con los estándares internacionales de materiales comerciales con características similares, como el estándar ASTM o ISO (Attias et al. 2020).

De acuerdo con la siguiente ilustración, las propiedades de las espumas a base de micelio superan a las espumas de EPS en cuando a la resistencia a la compresión, no obstante, en absorción de agua también lo superan. Por lo tanto, para cumplir con los requisitos generales de rendimiento de las espumas sintéticas comerciales, el enfoque debe dirigirse a reducir la densidad del material seco, mejorar la resistencia a flexión y disminuir la permeabilidad al agua.

	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (kPa)	Resistencia a la flexión (kPa)	Absorción de agua (%)	Estabilidad dimensional (%)	Resistencia térmica (K·m ² /W)
Compuestos de micelio	59–318 ^[1]	1–72 ^[2] 350–570 ^[3]	7,0–26,1 ^[2] 4,6–17,9 ^[3]	300 ^[2]	0,64–2,4 ^[2]	0,82–1,5 ^[2]
Tablero EPS ^[4]	12–48	35–690	70–690	0.3–4	<2	0,55–0,88

Ilustración 8. Resumen de las propiedades físico-mecánicas generales de los compuestos de micelio actuales. Fuente: (Attias et al., 2020).

Equipo y material

A continuación, se describen los elementos necesarios que se utilizaron para empezar con la etapa de experimentación.

Olla de autoclave: Para esterilizar el sustrato.

Horno de laboratorio: para deshidratar e inactivar el micelio una vez que invadió el sustrato y adoptó la forma del molde.

Micelio: *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum*).

Sustratos: aserrín de pino y cartón reciclado.

Frasco de vidrio: para poder verificar el avance del crecimiento del micelio.

Algodón: limpieza con alcohol para eliminar agentes externos que puedan tener los contenedores y afecten al micelio.

Hielera: para controlar la temperatura de crecimiento.

Bolsas de polipropileno: Para el crecimiento del micelio junto al sustrato (aserrín y cartón)

Alcohol en spray: eliminación de agentes externos.

Termómetro interior/externo: control de temperatura.

Cubrebocas: parte del equipo de protección personal, para crear una barrera de protección entre el micelio y las posibles bacterias que pueda contener la boca humana que puedan invadirlo.

Guantes: parte del equipo de protección personal, para crear una barrera de protección entre el micelio y las manos.

Molde: Se armó un molde 15x15x15 cm.

Báscula: para controlar la mezcla micelio/sustrato.



Ilustración 9. Equipo necesario para la experimentación.



Ilustración 10. Materiales necesarios para la experimentación.

Experimentación: obtención del biocompuesto

Primeras exploraciones

El siguiente capítulo comprende sobre la experimentación y todas las etapas para la obtención del material biocompuesto.

Previo al desarrollo de cada etapa se hicieron las primeras exploraciones de la mezcla ideal de micelio y sustrato; se tomó en cuenta el tiempo y la facilidad de invasión del micelio al sustrato, de igual manera se consideró, que durante todo el proceso de inoculación el micelio no fuera vulnerable o propenso a ser invadido por otro tipo de hongo.

Tal como lo indica la siguiente imagen se utilizó el micelio de *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma* y como sustratos el cartón y aserrín de pino.

Exploración de micelio / sustrato	
Micelio	Sustrato
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Cartón
<i>Ganoderma Lucidum</i>	Aserrin de pino

Ilustración 11. Mezcla de micelio y sustrato.

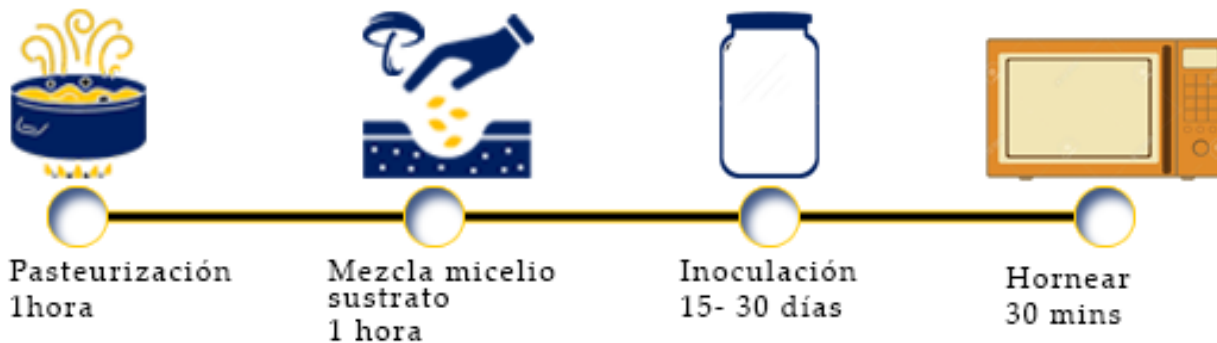


Ilustración 12. Mezcla de micelio y sustrato.

La ilustración 12: muestra el proceso que se siguió para las primeras exploraciones, comenzando con la pasteurización del sustrato: alrededor de 1 hora a fuego alto, esto con la finalidad de evitar que otro tipo de hongo lo invadiera. En segunda instancia se procedió a mezclar el micelio y el sustrato: en la tabla 2, muestra la cantidad que se usó para cada elemento (50 gr. de micelio y 50 gr. de sustrato) en total 100 gr. de material, se prepararon 12 muestras en total, 6 de *Pleurotus ostreatus* y 6 de *Ganoderma*, mezcladas con cartón y aserrín respectivamente, enseguida estos se vertieron en una bolsa de doble sello.

Como tercer paso se vertieron las mezclas en sus respectivos frascos estos previamente esterilizados, en el cual se dio un seguimiento del crecimiento día a día de cada mezcla, para evaluarlo.

Como conclusión de esta etapa: se pudo observar que el aserrín como sustrato tarda más en ser invadido tal como lo muestra la tabla 2 el cual va entre 23 y 26 días, además era propenso a ser invadidos por otro hongo lo cual empezaba a generar un olor desagradable y en especial cuando se mezclaba con el micelio de *Ganoderma*, por lo cual de primera instancia se procedió a descartar el aserrín como sustrato.

Se procedió a analizar el cartón como sustrato, en el cual el micelio de *Ganoderma* tardada alrededor de 17 y 19 días en invadirlo, caso contrario al de *Pleurotus ostreatus* el cual tardaba alrededor de 14 y 15 días, ante estos resultados se decidió continuar con la mezcla *Ganoderma* y cartón, para futuras exploraciones para la obtención del prototipo final.

Diseño de Mezcla			
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
<i>Ganoderma lucidum</i>	50 g.	<i>Ganoderma lucidum</i>	50 g.
Aserrín	10 g.	Cartón	50 g.
Tiempo de inoculación			
Muestras	Días	Muestras	Días
GA1	24	GC1	19
GA2	23	GC2	18
GA3	25	GC3	17
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
<i>Pleurotus ostreatus</i>	50 g	<i>Pleurotus ostreatus</i>	50 g
Cartón	10 g	Aserrín	50 g
Tiempo de inoculación			
Muestras	Días	Muestras	Días
PC1	15	PA11	25
PC2	14	PA12	25
PC3	15	PA13	26

Tabla 2: Tiempo de inoculación de micelio.



Ilustración 14. Pasteurización de sustrato.



Ilustración 13. Inoculación de micelio en frascos.

Una vez definido la mezcla ideal, se procedió a trabajar en las siguientes 5 etapas: para la obtención del prototipo. A continuación, se describen cada una de las ellas.

Etapa I

Consistió en el desarrollo de 3 presentaciones del micelio con cartón, el primero: cartón machacado con micelio, segundo: cartón recortado en trozos con micelio, por último: cartón machacado con micelio y agregados de TPS (harina, glicerina). Con la finalidad de explorar cual da los mejores resultados en cuestiones de crecimiento y dota de resistencia mecánica (compresión y flexión) al prototipo final.

Se descartó seguir trabajando con la mezcla de micelio, cartón machacado y agregados de TPS: debido a que era propenso a ser invadido por otro tipo de micelio y el tiempo de invasión era más: aproximadamente 25 días, aunado no se lograba una invasión completa.



Ilustración 15. Presentación de cada una de las mezclas.

En la ilustración 15 podemos apreciar cada una de las mezclas una vez que fueron introducidos al horno para detener el crecimiento del micelio que a la vez conllevó a la pérdida de humedad del biocompuesto: en los primeros dos casos la invasión del micelio fue completa y exitosa, por el contrario, para el tercer caso la pérdida de humedad no fue lo suficiente, además en los círculos amarillos se podrá apreciar la presencia de otros agentes externos que invadieron al biocompuesto.

Etapa II - Diseño de molde

En esta etapa se identificó el material ideal para utilizarlo como molde, así mismo se verificaron geometrías y espesor, de acuerdo a bibliografía consultada no se recomendaba utilizar materiales derivados del petróleo como molde, puesto que el micelio no era capaz de crecer debido al estrés y falta de oxígeno, por lo cual se empezó a trabajar con un molde de MDF pero debido a que este contiene los nutrimentos necesarios para el micelio, lo empezó a invadir, derivado de lo anterior se experimentó con poliestireno expandido, teniendo el cuidado necesario de que entrara suficiente oxígeno al molde y este fue el que resultó exitoso, cabe mencionar que estos moldes eran cuadradas, posteriormente también se experimentó con poliestireno expandido pero en forma circular, debido a cuestiones de resistencia mecánica se descartó este último.

Al final se decidió por la forma cúbica, de 15 x 15 x 15 cm, procediendo a armarlo en poliestireno expandido para los primeros prototipos, en el caso de los prototipos finales se mandó a extruir un molde de PETG (copolímero utilizado para la impresión 3D) de las mismas dimensiones antes mencionadas.



Ilustración 16. Proceso de etapa 1.



Ilustración 18. Exploración con molde de MDF.



Ilustración 17. Exploración con molde de poliestireno expandido.

Etapa III - Preparación de sustrato

Constó de la preparación del sustrato, enseguida el tamizado del aserrín, simultáneamente en el caso del cartón se elaboró en dos presentaciones: primeramente, en cortes rectangulares luego en machacado. A continuación, la eliminación de agentes externos del sustrato, mediante la pasteurización; se utiliza una olla, el cual se expuso alrededor de 60 minutos a fuego alto. Posteriormente se coló el sustrato para perder humedad, finalmente se pesó para de este modo mezclarlo con el micelio (*Pleurotus ostreatus*).



Ilustración 20. Proceso de etapa 2.



Ilustración 19. Cartón en cortes rectangulares.



Ilustración 21. Cartón machacado.

Etapa IV

Definida la mezcla ideal, se vertió en un molde previamente esterilizado, con el propósito de obtener la geometría deseada, y se esperó alrededor de 15 días para la invasión exitosa del micelio.

Enseguida, con el objetivo de detener el crecimiento del micelio, se procedió a secarlo mediante un horno de laboratorio, con una temperatura promedio de 100°C. en 60 minutos, por último, se desmoldó el prototipo final.

Etapa IV Crecimiento de micelio



Vertido en
molde



Pérdida de
humedad



Desmolde
producto final

Ilustración 22. Proceso de etapa 4.



Ilustración 23. Prototipo final obtenido con cartón machacado y micelio.



Ilustración 24. Prototipo final obtenido con cartón machacado y micelio.

The image shows several rectangular samples of a composite material, likely a resin matrix with a cork or wood-based filler. The samples are arranged on a dark surface, with a white ruler visible in the background for scale. The material has a light-colored, porous matrix with irregular brown and tan particles embedded within. The text 'CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL' is overlaid in the center of the image.

CARACTERIZACIÓN
DEL MATERIAL

Esta etapa comprende el estudio del prototipo a través de ensayos de laboratorio, con el objetivo de evaluar las características físico-mecánicas del biocompuesto a través de pruebas de compresión, flexión, absorción de agua, solubilidad, biodegradación y microscopía.

Normatividad

El material no cuenta con normas al cual acogerse (no tiene normas propias), no obstante, se tomó la decisión de evaluarlo con normas conforme al uso final del prototipo, mencionar que estos se utilizarán sólo como parámetro de referencia y comparación para los resultados obtenidos.

A continuación, las normas con las cuales se trabajó:

- **ASTM D 790: Método de prueba estándar para las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos.**
- **ASTM D1621: Método de prueba estándar para las propiedades de compresión de plásticos celulares rígidos.**
- **NMX-C-137-ONNCCE-2010: Industria de la construcción-espuma rígida de poliestireno, eps-especificaciones y métodos de ensayo.**
- **ASTM D 2842: Método de prueba estándar para absorción de agua de plásticos celulares rígidos.**
- **ASTM D3132: Método de prueba estándar para el rango de solubilidad de resinas y polímeros.**
- **ASTM D5338: Método de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas, incorporando temperaturas termófilas.**

Criterios de inclusión, exclusión y eliminación

La tabla 3 presenta los criterios de selección considerados para los especímenes, con la finalidad de eliminar cualquier anomalía que vaya a comprometer los ensayos de laboratorio.

Criterios de inclusión, exclusión y eliminación		
Criterios de inclusión	Criterios de exclusión	Criterios de eliminación
Libres de torsión y sus superficies opuestas deben ser paralelas y las superficies adyacentes perpendiculares.	Presente torsión	Aquellos que se rompan fuera del tercio central de la longitud de su tramo se descartarán y se ensayarán nuevas probetas en su lugar.
Todas las superficies y bordes deben estar libres de rayones, hoyos, marcas de hundimiento y rebabas.	Que contenga rayones, hoyos, marcas de hundimiento y rebabas	Sin bordes rectos y placas planas
Observación visual contra bordes rectos, cuadrados y placas planas		Las medidas varían ± 2 mm.
Midiendo con calibradores micrométricos.		

Tabla 3: Criterios de inclusión y exclusión.



Ilustración 26. Ejemplo de probeta en condiciones que fueron descartadas.



Ilustración 25. Ejemplo de probeta ideal para el sometimiento de pruebas.

Instrumentos de medición

Los ensayos mecánicos se realizaron en el laboratorio de Pruebas Mecánicas del Instituto de Investigaciones en Materiales - UNAM el cual está a cargo del M. en C. en Ing. de Materiales: Eliezer Hernández Mecinas, a continuación, se especifica cada equipo del cual se hizo uso para los ensayos que se llevaron a cabo.

En la siguiente tabla se presenta el horno del cual se hizo uso para secar las probetas durante un tiempo de 6 horas a una temperatura de 100°C., posteriormente someterlos a los ensayos mecánicos.

Pérdida de humedad		
Parámetros de ensayo		
Equipo	Tiempo	Temperatura
Horno INS-TRON SFL	6 horas	100° C.



Ilustración 27. Presentación de probetas en horno.



Ilustración 28. Proceso de secado en horno.

Uso de báscula para determinar el peso fresco y seco de las probetas, así como de un calibrador vernier digital para las medidas.



Equipo	Báscula	
Marca	Mettler	
Modelo	Toledo	
Descripción	Báscula de precisión hasta 0.0001g	
Equipo	Calibrador vernier digital	

Tabla 5: Equipo necesario para la toma de dimensiones y pesaje de las probetas.



Ilustración 29. Toma de medidas de las probetas.



Ilustración 30. Presentación de probetas para selección.

Para el ensayo de compresión se utilizó la maquina universal, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D1621 el cual determinó las dimensiones de las probetas, así mismo la velocidad de ensayo, en la siguiente tabla se detallan los parámetros.

Compresión		
Parámetros de ensayo		
Norma	Velocidad de ensayo	Valores obtenidos
ASTM D1621	3 mm por minuto	Esfuerzo a la compresión.
Probetas	L2 cuadrado	Altura
	mm ²	mm
	28	55
Equipo	Maquina universal para pruebas mecánicas, Instron 1125 con sistema para su manejo por medio de ordenador.	

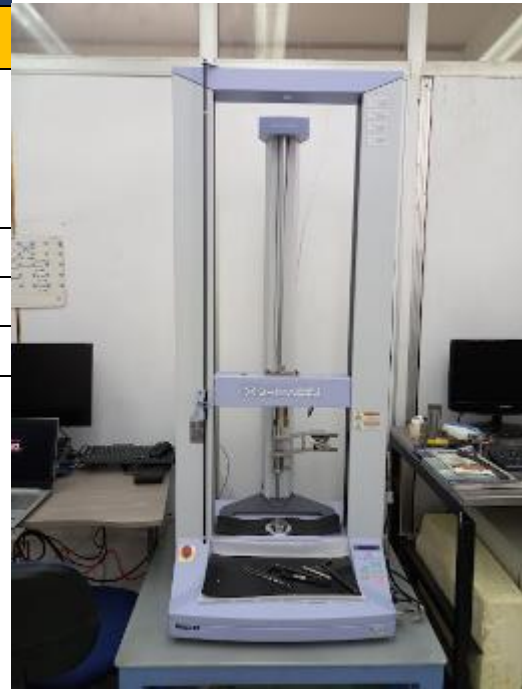


Tabla 6: Parámetros de ensayo de compresión.



Ilustración 32. Ensayo de compresión.



Ilustración 31. Ensayo de compresión.

Para el ensayo de flexión se utilizó la maquina universal, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D790 el cual sirvió para determinar las dimensiones de las probetas y la velocidad de ensayo, en la siguiente tabla se detallan los parámetros.

Flexión			
Parámetros De Ensayo			
Norma	Velocidad de ensayo	Valores obtenidos	
ASTM D 790	0.53 mm por minuto	Esfuerzo de flexión.	
		Deformación por flexión	
		Módulo de flexión	
PROBETAS	Ancho	Largo	Espesor
	mm	mm	mm
	20	100	20
EQUIPO	Maquina universal para pruebas mecánicas, Instron 1125 con sistema para su manejo por medio de ordenador		

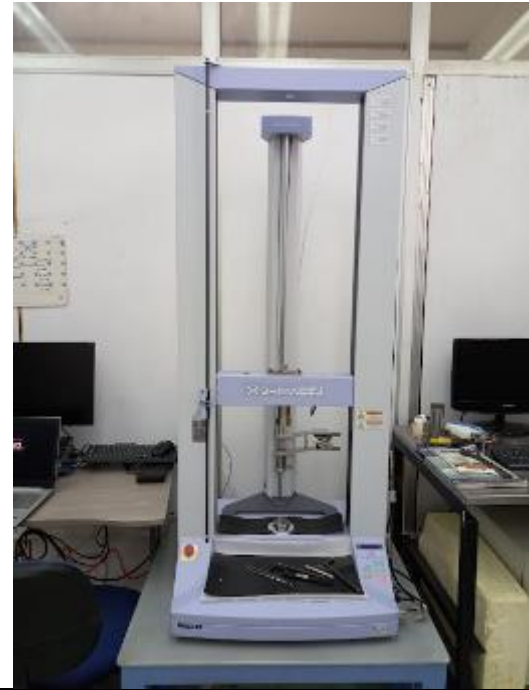


Tabla 7: Parámetros de ensayo de flexión.



Ilustración 34. Ensayo de flexión.



Ilustración 33. Ensayo de flexión.

Para la prueba de absorción de agua se siguieron los lineamientos de la norma ASTM D 2842, en la tabla 8 se detalla los parámetros del ensayo.

Absorción de agua			
Equipo	Contenedores - Báscula		
Norma	ASTM D 2842		
Probetas	Largo (mm) 100 mm	Ancho (mm) 20 mm	Espesor (mm) 20 mm
Material	Agua y contenedor.		




Tabla 8: Parámetros de ensayo de absorción de agua.

En la prueba de solubilidad se siguieron los lineamientos de la norma ASTM D3132, en la siguiente tabla se detallan los parámetros del ensayo.

Solubilidad			
Equipo	Frascos - báscula		
Norma	ASTM D3132		
Probetas	Largo (mm) 55 mm	Ancho (mm) 28 mm	Espesor (mm) 28 mm
Material	Agua y contenedores.		




Tabla 9: Parámetros de ensayo de solubilidad.

Para la prueba de biodegradación se siguieron los lineamientos de la norma ASTM D5338, en la siguiente tabla se detallan los parámetros del ensayo.

Biodegradación			
Equipo	Contenedores - báscula		
Norma	ASTM D 5338		
Probetas	Largo (mm) 100 mm	Ancho (mm) 20 mm	Espesor (mm) 20 mm
Material	Agua, composta y contenedores.		


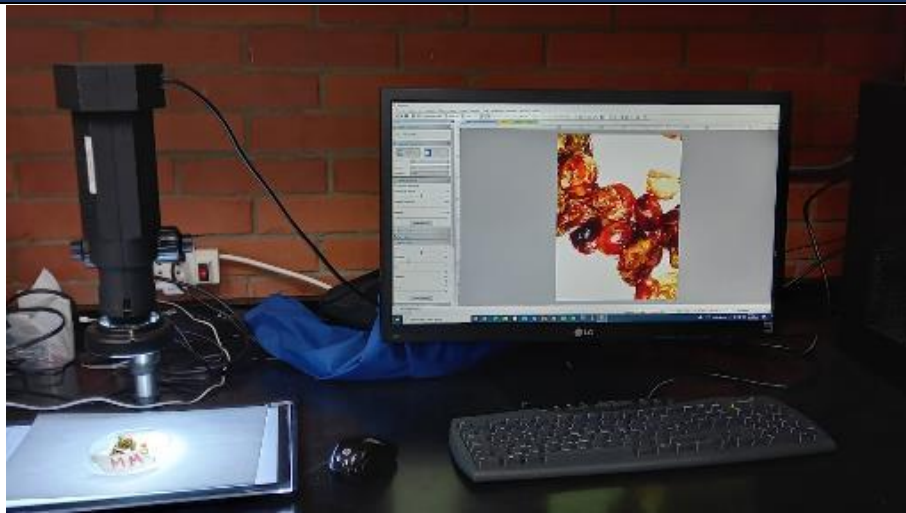


Tabla 10: Parámetros de ensayo de biodegradación.

Los ensayos de microscopía se realizaron en el laboratorio del Instituto de Biología - UNAM el cual está a cargo de la Dra. en Biología Estela Sandoval Zapotitla a continuación, se especifica cada equipo del cual se hizo uso.

Equipos de ensayo

Equipo Rising Tech -
Monozoom
EDF 2.0



Equipo Zeiss Axios-
kop



Cámara

Rising View V4.10

Tabla 11: Parámetros de ensayo de microscopía.

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron de cada prueba.

Peso seco - densidad

Se tomó el peso fresco de cada una de las probetas, de igual manera una vez finalizado el proceso de secado se volvió a pesar cada espécimen, con el objetivo de obtener el porcentaje de pérdida de peso conforme a la pérdida de humedad, esto ayudó a determinar la densidad, los resultados obtenidos se pueden apreciar a continuación.

La densidad se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación: $Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$

Compresión						
Grupo	Espécimen	Peso fresco	Peso seco	Pérdida de humedad	Volumen	Densidad (kg/m ³)
CG0	1	41 g	11 gr	45.10%	0.00004312	255.10
	2	41 gr	13 gr	53.30%	0.00004312	301.48
	3	40 gr	14 gr	56.00%	0.00004312	324.68
	4	42 gr	14 gr	58.80%	0.00004312	324.68
	5	42 gr	12 gr	50.40%	0.00004312	278.29
Promedio				52.72%		296.85
Desviación estándar				0.04722457		27.05
CG1	1	42 gr	12 gr	50.40%	0.00004312	278.29
	2	41 gr	12 gr	49.20%	0.00004312	278.29
	3	43 gr	10 gr	43.00%	0.00004312	231.91
	4	42 gr	15 gr	63.00%	0.00004312	347.87
	5	41 gr	10 gr	41.00%	0.00004312	231.91
Promedio				49.32%		273.65
Desviación estándar				0.077134687		42.51
Flexión						
Grupo	Espécimen	Peso fresco	Peso seco	Pérdida de humedad	Volumen	Densidad
FG0	1	36 gr	16 gr	57.60%	0.00004	400.00
	2	37 gr	14 gr	51.80%	0.00004	350.00
	3	39 gr	13 gr	50.70%	0.00004	325.00
	4	37 gr	12 gr	44.40%	0.00004	300.00
	5	36 gr	14 gr	50.40%	0.00004	350.00
Promedio				50.98%		345.00
Desviación estándar				0.042001905		33.17
FG1	1	36 gr	15 gr	54.00%	0.00004	375.00
	6	37 gr	14 gr	51.80%	0.00004	350.00
	3	36 gr	16 gr	57.60%	0.00004	400.00
	4	35 gr	14 gr	49.00%	0.00004	350.00
	5	35 gr	15 gr	52.50%	0.00004	375.00
Promedio				52.98%		370.00
Desviación estándar				0.02823048		18.71

Tabla 12: Pérdida de humedad en probetas.

Ensayos de compresión

El ensayo de compresión consiste en someter un espécimen de prueba a una carga axial constante. La obtención de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión se ha realizado mediante los métodos de ensayo y parámetros establecidos en la norma ASTM D1621. Se efectuó un muestreo de dos variables bajo la denominación CG0 y CG1, se contempló 5 especímenes de prueba para cada variable, los cuales fueron ensayados en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Instituto de Investigaciones en Materiales – UNAM.

Ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas condiciones (temperatura, humedad, mezcla), geometría y proceso de fabricación. El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la variable CG0 consiste en someter a prueba los especímenes con geometría rectangular constituidos a base de micelio y cartón en trozos, con el fin de observar el comportamiento mecánico a la compresión del material biocompuesto, de la misma manera con el grupo CG1 el cual está elaborado con micelio y cartón machacado.

Los valores obtenidos del ensayo de compresión de los especímenes CG0 y CG1 se muestran en las siguientes tablas. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó la resistencia a la compresión para una deformación del 5% (kPa) para poder efectuar la comparación con los datos del poliestireno expandido de acuerdo a la norma NMX-C-137-ONNCCE-2010, así como las gráficas de esfuerzo-deformación de cada espécimen.

Probeta	Módulo Elástico kPa	Máximo Esfuerzo kPa	Máximo de- formación	Resistencia a la compresión para una deformación del 5% (kPa)
1	16416.270	263.552	16.20%	222.01
2	1960.401	190.177	14.30%	117.49
3	873.147	120.028	22.69%	91.22
4	.-	91.773	6.46%	81.53
5	1524.089	131.311	18.02%	107.91
Media	5193.477	159.368	15.54%	107.910
Desviación Estándar	7495.19	68.3875	5.95%	56.54

Tabla 13: Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes CG0.

Probeta	Módulo Elástico kPa	Máximo Esfuerzo kPa	Máximo de- formación	Resistencia a la compresión para una deformación del 5% (kPa)
1	1955.359	115.392	6.82%	96.43
2	1989.755	148.704	8.23%	113.53
3	1156.607	98.510	12.09%	62.01
4	3439.977	150.822	6.29%	141.70
5	1675.790	94.528	8.97%	70.10
Media	2043.498	121.591	8.48%	96.430
Desviación Estándar	848.910	26.8939	2.28%	32.48

Tabla 14: Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes CG1.

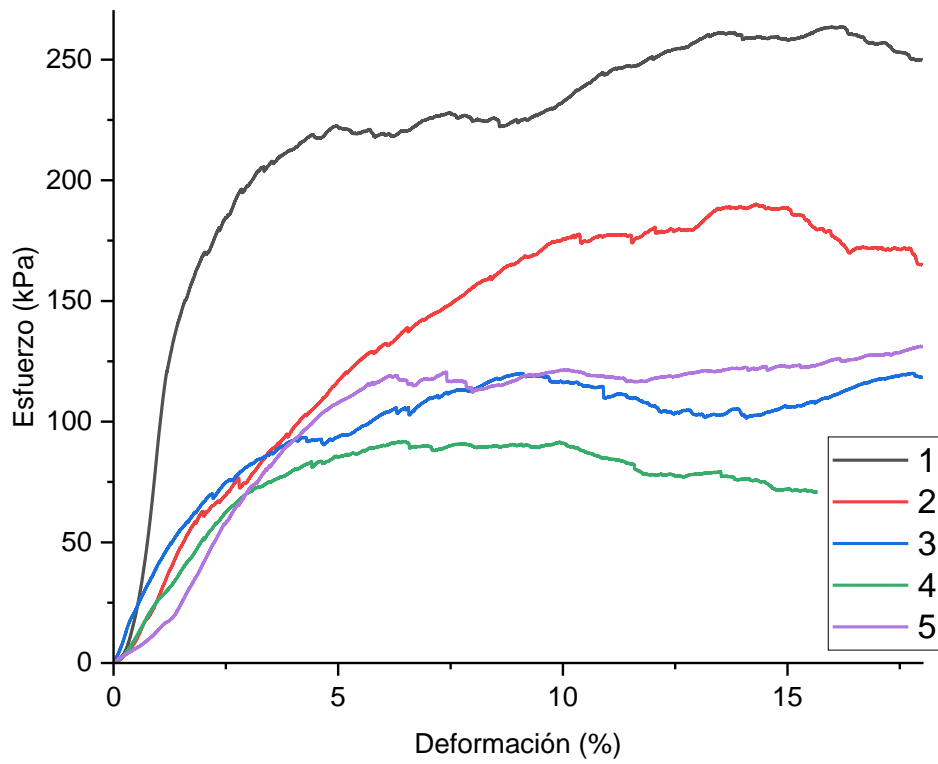


Gráfico 1. Comportamiento del grupo CG0 bajo esfuerzo de compresión.

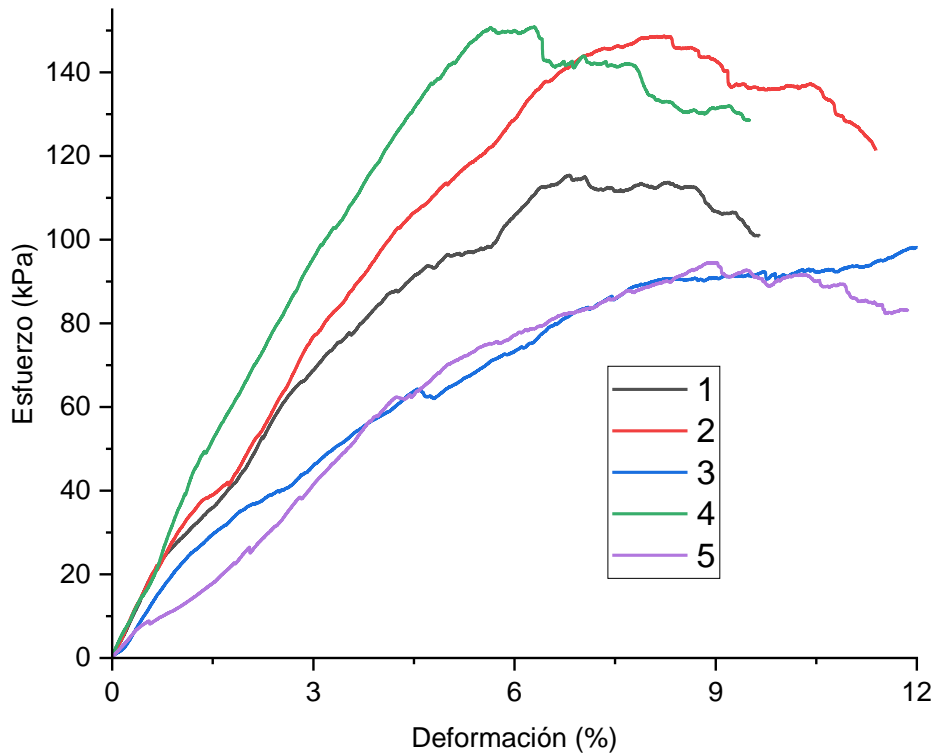


Gráfico 2. Comportamiento del grupo CG1 bajo esfuerzo de compresión.



Ilustración 35. Presentación de especímenes de prueba a compresión.

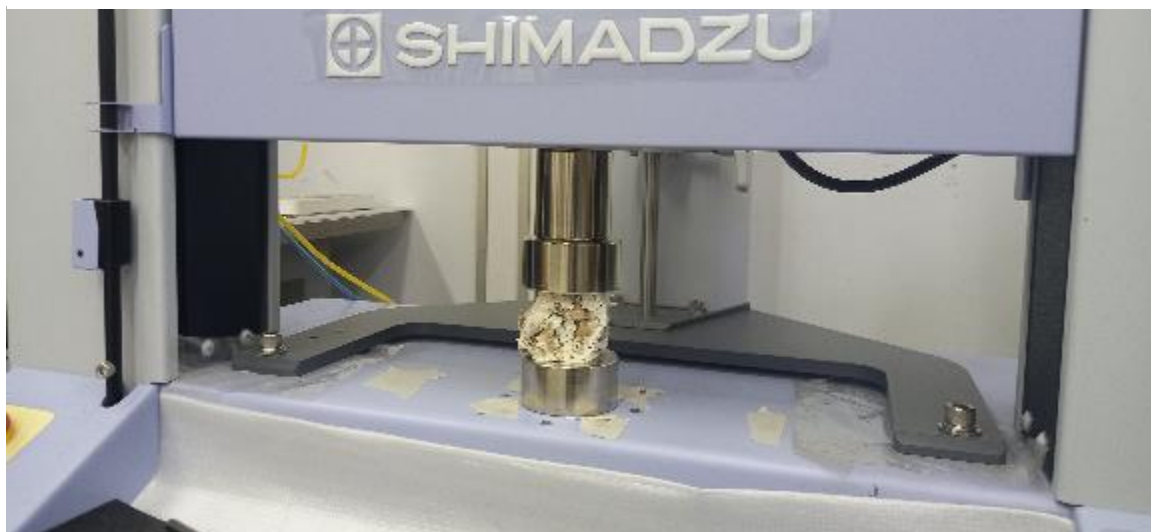


Ilustración 36. Espécimen de prueba a compresión del grupo CG0.



Ilustración 37. Espécimen de prueba a compresión del grupo CG1.

Ensayos de flexión

El comportamiento mecánico bajo una fuerza de flexión, se ha realizado mediante el método de ensayo ASTM D 790 y los parámetros establecidos. El ensayo consta en colocar la muestra posicionada en dos puntos de apoyo a 80 mm de distancia, y un tercer punto de apoyo presiona desde el centro superior de la muestra, generando así un momento flexionante. Se efectuó un muestreo de dos variables bajo la denominación FG0 y FG1, se contempló 5 especímenes de prueba para cada variable, los cuales fueron ensayados en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Instituto de Investigaciones en Materiales – UNAM.

Ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas condiciones (temperatura, humedad, mezcla), geometría y proceso de fabricación. El ensayo a la flexión de la variable FG0 consiste en someter a prueba los especímenes con geometría rectangular constituidos a base de micelio y cartón en trozos, con el fin de observar las propiedades mecánicas de flexión del material biocompuesto, de la misma manera con el grupo CG1 el cual está elaborado con micelio y cartón machacado.

Los valores obtenidos del ensayo de flexión de los especímenes FG0 y FG1 se muestran en las siguientes tablas. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó la resistencia al 5% de deformación a la flexión para poder efectuar la comparación con los datos del poliestireno expandido de acuerdo a la norma NMX-C-137-ONNCCE-2010, así como las gráficas de esfuerzo de cada espécimen.

Probeta	Modulo Flexión Esfuerzo 20 -100 (kPa)	Esfuerzo 2 % (kPa)	Desplazamiento 2 % (mm)	Deformación 2 % (%)	Máximo Es- fuerzo (kPa)	Máxima De- formación (%)
1	5071.31	295.806	4.408	8.265	305.438	9.269
2	4881.692	197.482	3.225	6.048	210.047	5.738
3	4532.77	211.644	3.600	6.750	282.288	16.924
4	3649.538	155.473	3.302	6.191	200.558	9.880
5	7354.614	223.374	2.769	5.192	274.777	10.738
Media	5097.984	216.756	3.461	6.489	254.622	10.510
Desviación Estándar	1374.53	51.1027	0.60745	1.13884	46.5396	4.05895

Tabla 15: Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de flexión del ensayo de los especímenes FG0.

Probeta	Modulo Flexión Esfuerzo 20 -100 (kPa)	Esfuerzo 2 % (kPa)	Desplazamiento 2 % (mm)	Deformación 2 % (%)	Máximo Esfuerzo (kPa)	Máxima De- formación (%)
1	15.702	131.464	1.627	3.051	179.434	1.843
2	8.629	145.507	1.900	3.562	185.466	2.236
3	14.215	218.248	1.932	3.622	242.209	2.487
4	11.459	252.152	2.186	4.098	269.365	3.568
5	15.873	--	--	--	275.588	2.292
Media	11.614	153.566	1.805	3.384	178.185	2.205
Desviación Estándar	3.76989	69.4422	0.27943	0.52348	83.2381	0.71541

Tabla 16: Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de flexión del ensayo de los especímenes FG1.

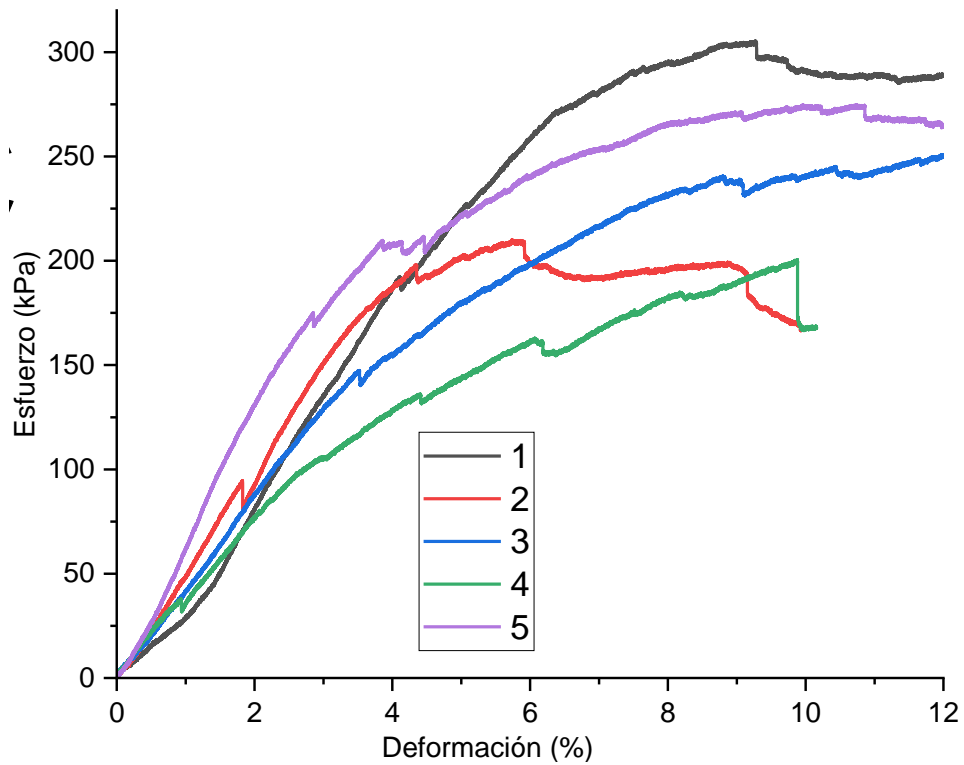


Gráfico 3. Comportamiento del grupo FGO bajo esfuerzo de flexión.

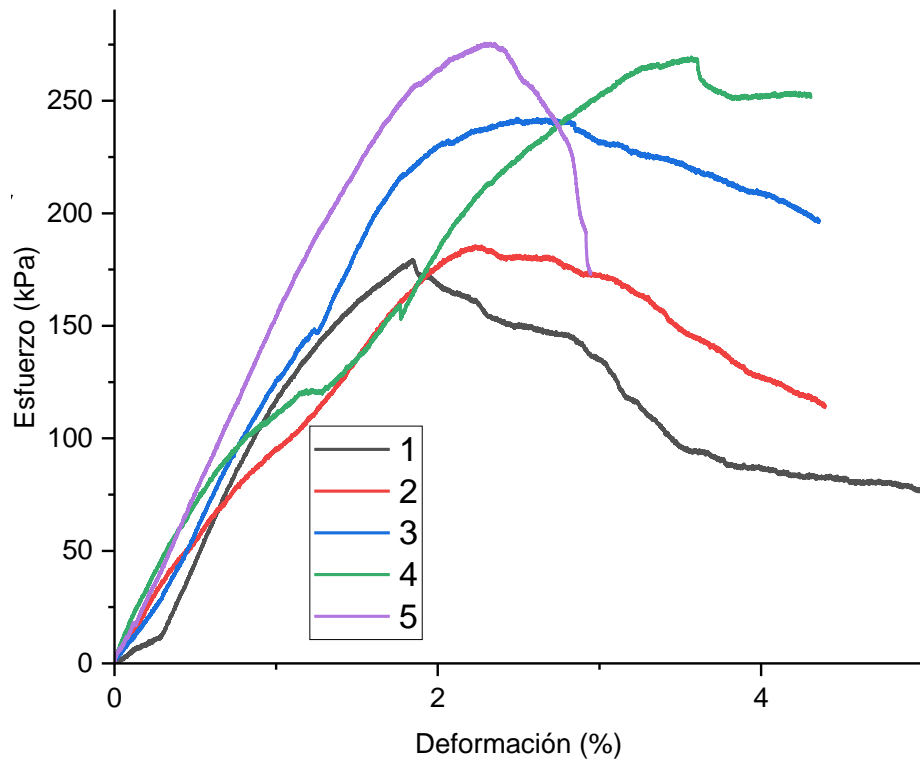


Gráfico 4. Comportamiento del grupo FG1 bajo esfuerzo de flexión.



Ilustración 39. Presentación de especímenes de prueba de flexión en 3 puntos.



Ilustración 38. Prueba de flexión en 3 puntos con un espécimen del grupo FG0.

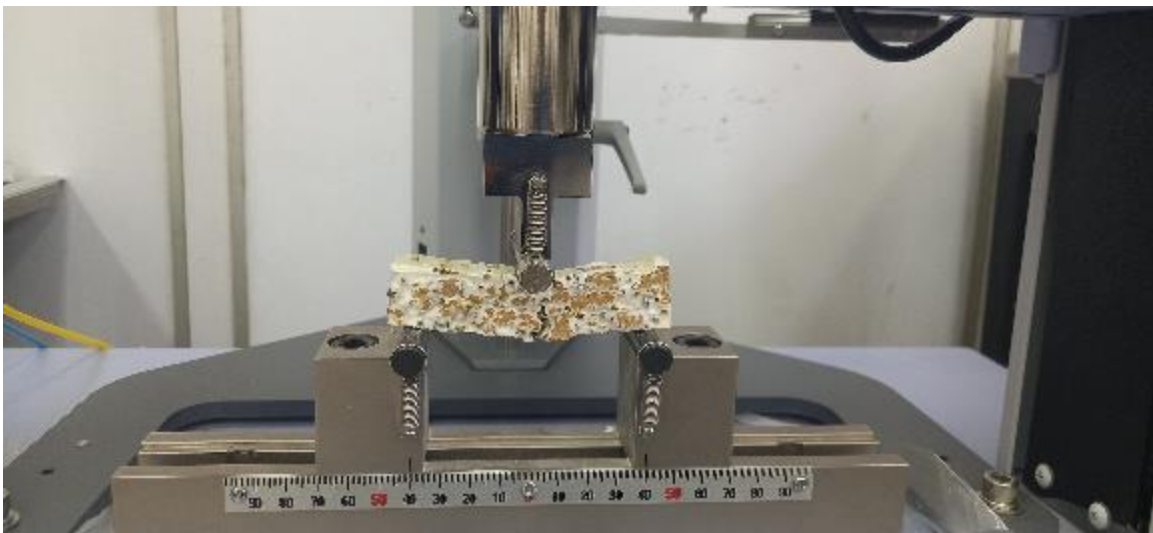


Ilustración 40. Prueba de flexión en 3 puntos con un espécimen del grupo FG1.

Ensayos de absorción de agua

Es el método por el cual se determina, el porcentaje de peso que aumenta un espécimen cuando se satura con agua y se define como el cociente entre el peso de agua que absorbe y su peso cuando está seco, expresado en porcentaje; este ensayo consistió en someter los especímenes de prueba bajo una cabeza de agua de 5.1 cm durante un periodo de inmersión de 24 horas, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D 2842 con el objetivo de determinar la diferencia entre el peso seco y después de la inmersión en agua.

Se efectuó un muestreo de dos variables bajo la denominación A0 (micelio con cartón en trozos) y A1 (micelio con cartón machacado), se contempló 3 especímenes de prueba para cada variable, ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas condiciones (temperatura, humedad, mezcla), geometría y proceso de fabricación.

Los especímenes fueron pesados después de diferentes tiempos 2, 4 y 24 horas de inmersión bajo el agua, cabe mencionar que, al momento de intentar sumergirlos, estos flotaban lo que indica que son menos densos que el agua, por lo cual se empleó un contrapeso para sumergirlos totalmente. Así mismo se valoró que no tuvieran ninguna deformación, agrietamiento o cambio en el aspecto de las muestras.

Por último, se determinó el porcentaje de absorción de agua por unidad de volumen como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

$$\text{Absorción de agua por unidad de volumen (g/cm}^3\text{)} = \frac{W-D}{V}$$

Donde:

W = Masa de la muestra después de la inmersión en agua, g

D = Masa de pre-inmersión de la muestra, g

V = volumen de la muestra cm³

Probeta	Peso seco	Tiempo de inmersión (peso)			Porcentaje de absorción
		2 horas	4 horas	24 horas	
A01	13 g	25 g	28 g	32 g	47.5%
A02	13 g	25 g	26 g	31 g	45.0%
A03	14 g	23 g	26 g	30 g	40.0%
A11	17 g	49 g	48 g	50 g	82.5%
A12	14 g	42 g	41 g	42 g	70.0%
A13	17 g	45 g	47 g	46 g	72.5%

Tabla 17: Valores de peso en gramos y porcentaje de absorción de los especímenes.

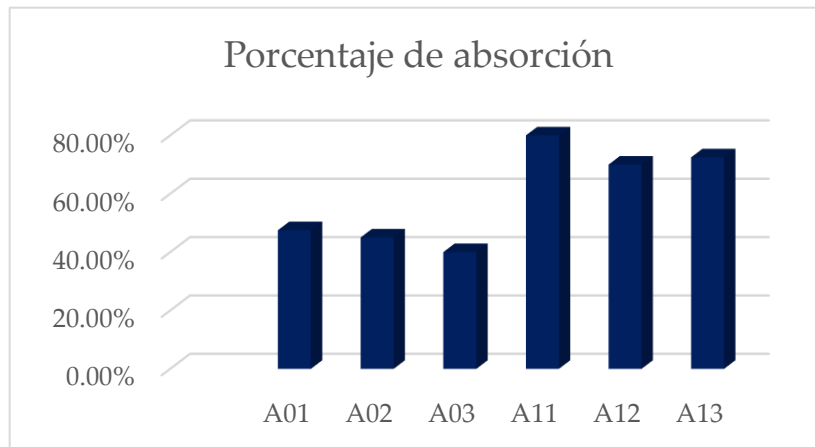


Gráfico 5. Comparación de absorción de humedad entre los grupos A0 y A1.



Ilustración 41. Presentación de especímenes para inmersión, se puede apreciar que dichos elementos flotan sobre el agua.



Ilustración 42. Inmersión de especímenes.

Ensayos de solubilidad

El ensayo es para determinar la solubilidad de los especímenes, bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM D3132 el cual indica el uso de reactivos y solventes, pero para los fines de esta investigación sólo se utilizó agua, con ayuda de frascos transparentes en el cual se introdujeron los especímenes, se fue tomando el peso y evaluando el cambio de color del agua en un lapso de 2.2 meses.

Se efectuó un muestreo de dos variables bajo la denominación S0 (micelio con cartón en trozos) y S1 (micelio con cartón machacado), se contempló 3 especímenes de prueba para cada variable, ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas condiciones (temperatura, humedad, mezcla), geometría y proceso de fabricación.

Los valores obtenidos del ensayo se muestran en la siguiente tabla, se pesaron los especímenes pasando los 7, 21, 35, 49 y 63 días de inmersión en el agua, con la finalidad de ir evaluando el peso, de la misma manera se fue tomando en cuenta el cambio de tonalidad del agua, como también se evaluó el desprendimiento de olores al paso del tiempo y la verificación de la viscosidad de los elementos inmersos, todo lo anterior mencionado para permitir un juicio visual preciso de la solubilidad completa.

Probeta	Peso seco	Tiempo de inmersión (peso)				
		7 días	21 días	35 días	49 días	63 días
S01	14 g	17 g	25 g	30 g	35 g	42 g
S02	13 g	16 g	24 g	29 g	33 g	42 g
S03	14 g	17 g	26 g	29 g	32 g	37 g
S11	17 g	21 g	24 g	28 g	30 g	36 g
S12	14 g	19 g	21 g	30 g	33 g	39 g
A13	17 g	20 g	25 g	29 g	33 g	38 g

Tabla 18: Valores de peso en gramos de los especímenes.

Cabe mencionar que a los 10 días de inmersión en el agua, el micelio se activó nuevamente, creando redes miceliales a través del agua, pero al paso del tiempo aproximadamente en el día 20 aparecieron otro tipo de micelios de un color azul turquesa que empezaron a invadir el existente, razón por la cual el color del agua empezó a tornarse de café hasta llegar a un color negro, junto a esto se empezó a desprender un olor desagradable, todo este proceso se puede apreciar en la siguiente ilustración.



Ilustración 43. Proceso de solubilidad en 63 días.

Ensayos de biodegradación

Este ensayo determina el grado y la tasa de biodegradación aeróbica de los materiales al exponerlos a un entorno de compostaje, dicho ensayo se desarrolló siguiendo los parámetros establecidos de la norma ASTM D5338 el cual indica que el compostaje aeróbico tiene lugar en un entorno en el que la temperatura, la aireación, la humedad se supervisan y controlan de cerca, como también el uso de reactivos y aparatos especiales.

Para los fines de esta investigación se realizaron pruebas caseras en el cual los especímenes de prueba se expusieron a un inóculo que deriva de un jardín casero (abono de plantas) el cual estaba libre de materiales inertes más grandes (vidrio, piedras, metales, etc.) con la finalidad de producir un inóculo de compost homogéneo, se cuidó que el compost tuviera suficiente porosidad para permitir que las condiciones sean lo más aeróbicas posibles como también en el lugar que se llevaron a cabo las pruebas.

Se efectuó el muestro de los especímenes y se contempló un total de 6, dichos elementos fueron elaborados bajo las mismas condiciones (temperatura, humedad, mezcla), geometría y proceso de fabricación, se utilizó una serie de 3 recipientes para el compostaje: 2 especímenes en cada recipiente.

Durante el tiempo de prueba se cuidó que las muestras tuvieran suficiente entrada de oxígeno en el recipiente de composta, porosidad y contenido de humedad, con el objetivo de hacer posible un buen proceso de compostaje, se incubaron las muestras en la oscuridad por un período de 63 días en un recinto libre de vapores tóxicos para los microorganismos, la temperatura se mantuvo entre 17°C y 20° C, se revisaban periódicamente las muestras para distribuir uniformemente la humedad.

Se determinó la pérdida de peso de cada espécimen tomando el peso inicial y el final después de 63 días de compost, los resultados se reflejan en la siguiente tabla.

Probeta	Peso inicial	Peso final
B01	15 g	2 g
B02	16 g	3 g
B03	12 g	2 g
B04	15 g	2 g
B05	13 g	1 g
B06	16 g	2 g

Tabla 19: Valores de peso en gramos de los especímenes.

A los 7 días de compost se observó que el micelio se activó nuevamente, en efecto se lograban apreciar a simple vista las redes miceliales, al paso del tiempo aproximadamente en el día 21 apareció otro tipo de micelio de un color azul turquesa que empezó a invadir el existente, de hecho los especímenes fueron tomando un color café más turbio, e iba apareciendo porosidad en los mismos, hasta llegar al día 63, por ende el micelio invade cierta área del compost, en suma, los especímenes se han desintegrado en un aproximado del 60% de su cuerpo, todo lo anterior con evidencia fotográfica a los 7, 21, 35, 49 y 63 días de exposición en el inóculo de compost, como se podrá observar en la siguiente ilustración.



Ilustración 44. Proceso de biodegradación en 63 días.

Ensayos de microscopía

Este método es un estudio detallado y de descripción anatómica de los componentes del material biocompuesto (micelio – cartón), a todo esto, analizar el comportamiento del micelio una vez que se detuvo su crecimiento y posterior a ser ahogado en concreto en un ambiente simulado, a propósito, verificar si resulta afectado por algún elemento que puedan contener las propiedades que conforman el concreto, los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Anatomía Vegetal del Instituto de Biología – UNAM a cargo de la Dra. Estela Sandoval Zapotitla.

Se efectuó un muestreo de dos variables bajo la denominación MCH 1, 2 y 3 (muestras del biocompuesto hundido en concreto) y MM (muestras intactas donde sólo se detuvo el crecimiento del concreto), se contempló 3 especímenes para las muestras MCH y 1 espécimen para MM, en el cual se hicieron los cortes, preparaciones e imágenes digitales aumentadas a X200 y X400 para la descripción anatómica de los especímenes, las imágenes se capturaron con ayuda del programa RisingView (cámara digital).

En la siguiente ilustración se puede visualizar las tomas realizadas a la muestra MM a X400, por ende, se puede apreciar toda la red de hifas (micelio) que se encuentra ramificada sobre el cartón, por añadidura, se observan esporas y fibras de cartón.

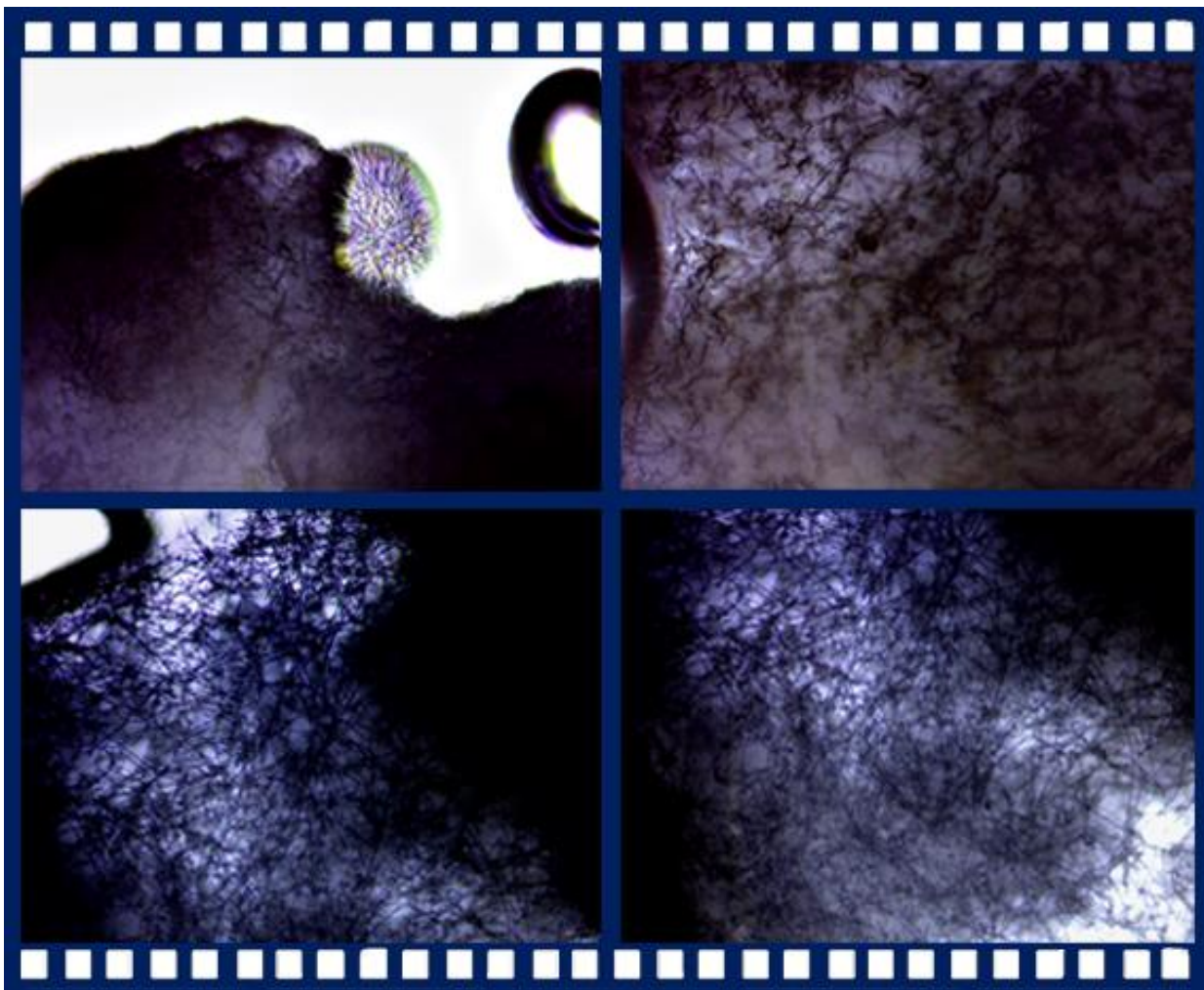


Ilustración 45. Serie de imágenes de la anatomía de la muestra MM a X400.

La siguiente ilustración es sobre la muestra MCH1 dicho espécimen fue hundido en concreto, en el ambiente simulado que se preparó, a propósito del uso final del prototipo, con la finalidad de conocer el comportamiento del micelio después de entrar en contacto con el concreto.

Se puede observar que se activó nuevamente la red de hifas (micelio), por añadidura, las esporas responsables de la expansión y algunas fibras de cartón, encima, se logra visualizar la presencia de otros elementos que de acuerdo a interpretación de especialistas del laboratorio son otro tipo de micelios pero que no se puede determinar microscópicamente su género.

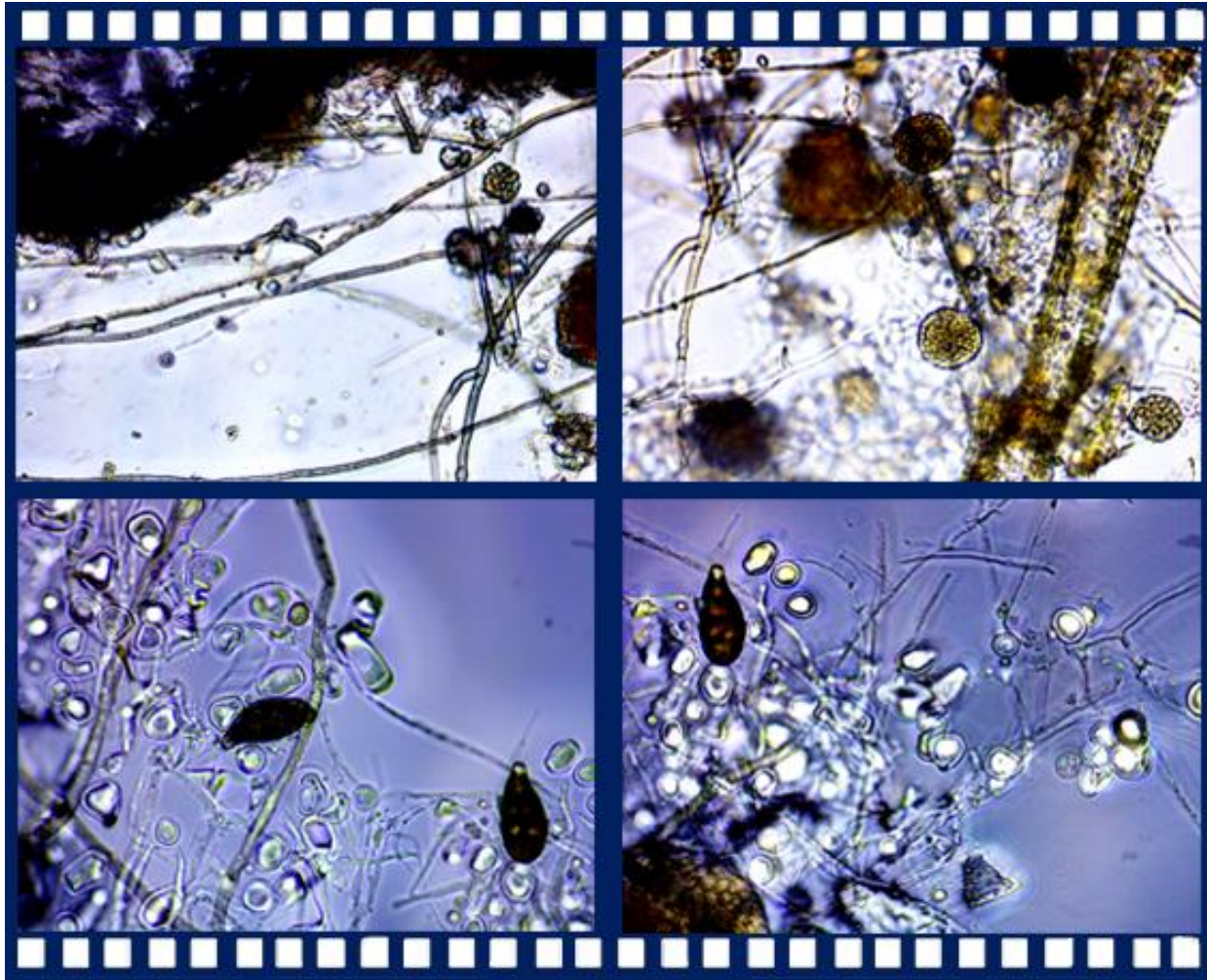


Ilustración 46. Serie de imágenes de la anatomía de la muestra MCH1 a X400.

Consecuentemente, se tomaron fotos del espécimen MCH2 que de igual manera fue hundido en concreto, por lo tanto, se obtuvo una serie de imágenes, en las cuales de acuerdo a interpretación de especialistas se observan nuevamente esporas y fibras de cartón, además se visualiza otro tipo de esporas que bien corresponden a otro micelio, como se podrá visualizar en la siguiente ilustración.

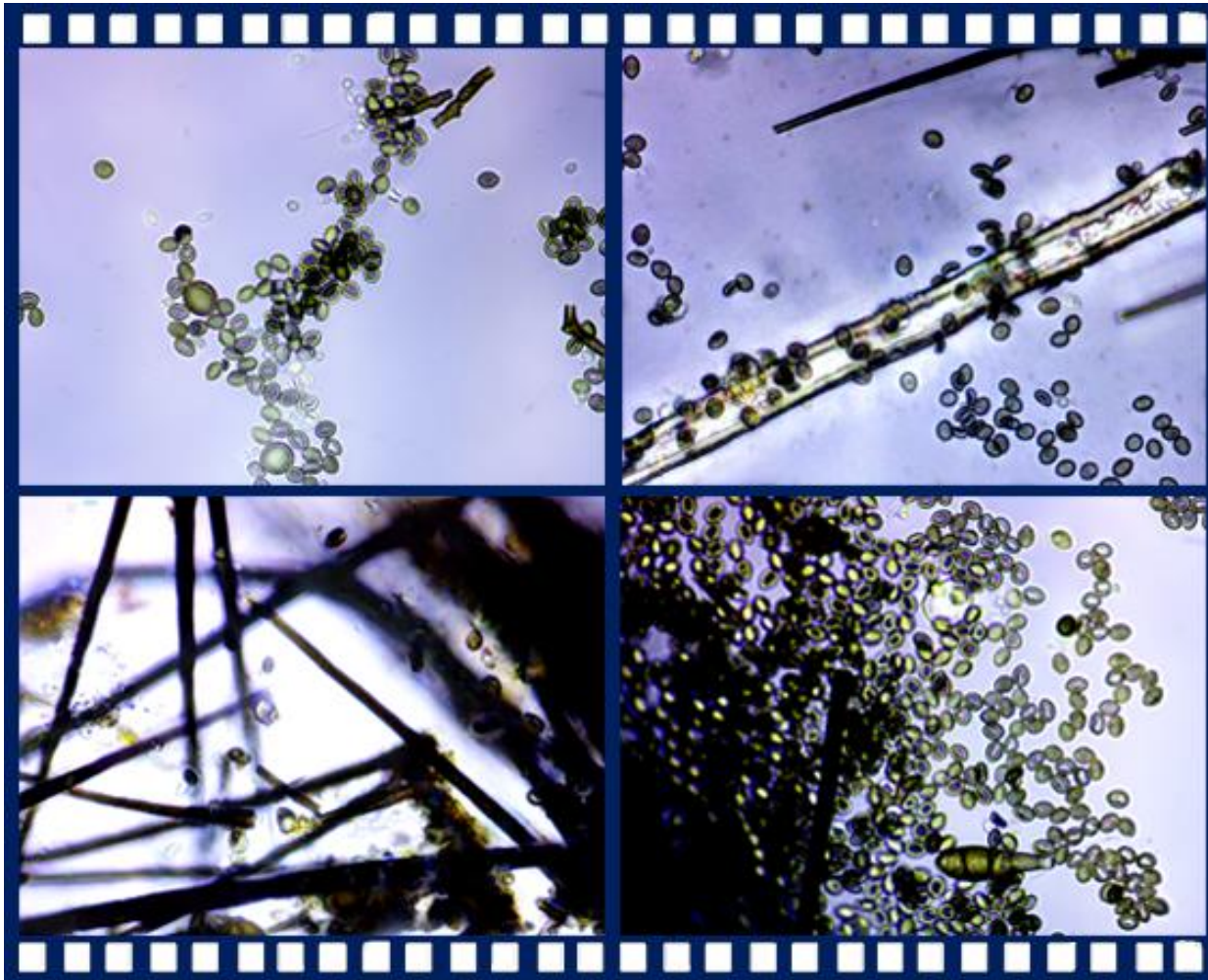


Ilustración 47. Serie de imágenes de la anatomía de la muestra MCH2 a X400.

De la misma manera la ilustración 48 corresponde a MCH3 dicho elemento también hundido en concreto, se aprecian nuevamente esporas y fibras de cartón.

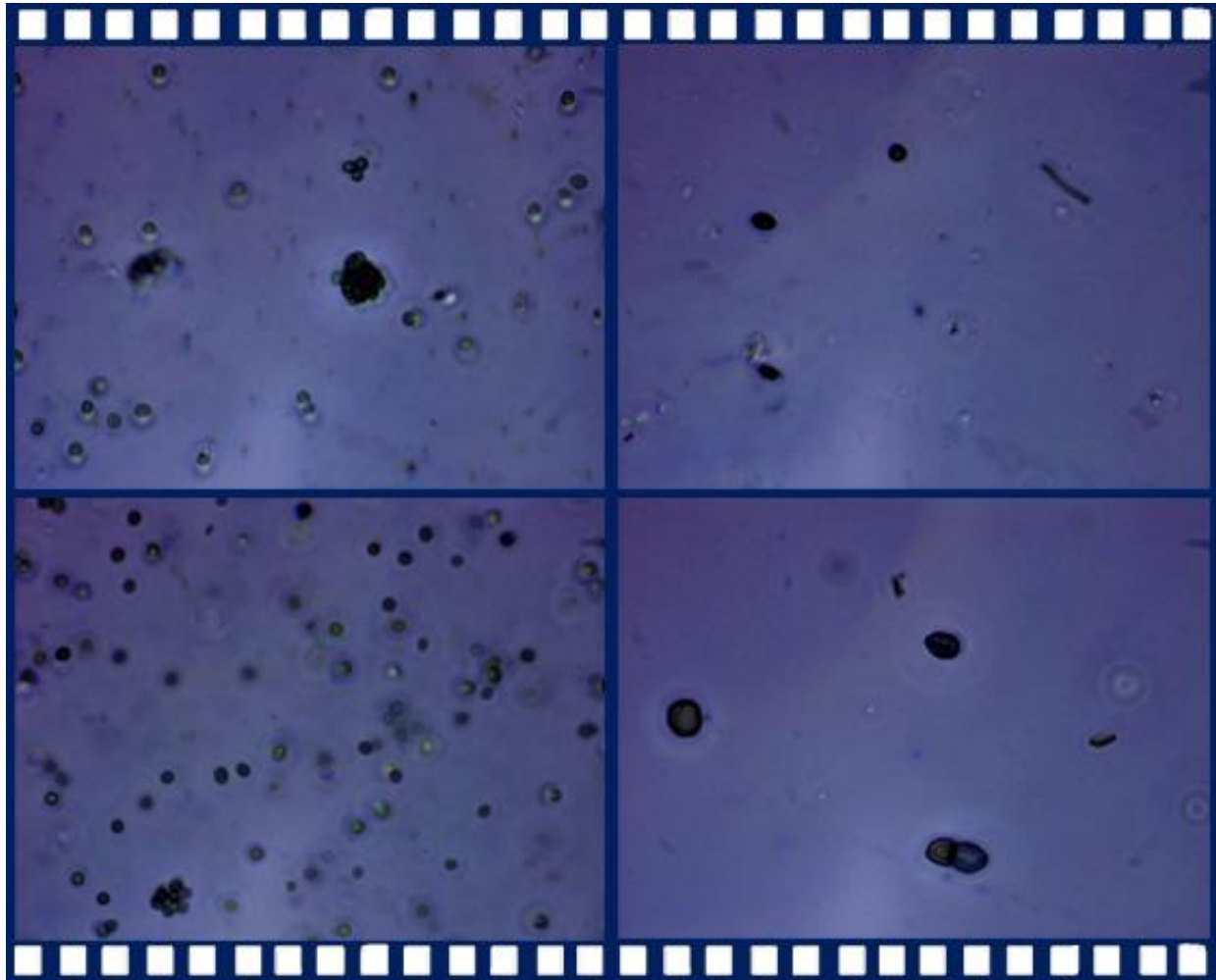


Ilustración 48. Serie de imágenes de la anatomía de la muestra MCH2 a X400.



VALIDACIÓN DE PROFOTIPO

Este es el nivel máximo que alcanza la investigación debido a los tiempos de maestría, en esta etapa consiste en la validación del prototipo en un ambiente relevante, por lo tanto, fue la implementación del prototipo en un sistema con todos sus componentes, por ende, un ambiente representativo y fuera de laboratorio.

Materiales

Prototipo 15x15x15
cm

Cimbra de madera
60x60x25 cm

Clavos

Alambrón 1/4

Alambre recocido

Arena

Grava

Cemento

Agua

Los componentes básicos fueron integrados al experimento con condiciones realistas razonables, de este modo: simulando una losa encasetonada, con motivo de, se preparó todos los elementos necesarios.

En las pruebas mecánicas de flexión y compresión, entre las dos variables que se probaron se comportó mejor en cuando a resistencia el cartón en trozos que el machacado, no obstante, en vista de ello, se decidió fabricar 2 prototipos de cada variable obteniendo un total de 4 a propósito de probarlos en el sistema simulado, dichos prototipos tienen una medida de 15x15x15 cm y espesor de 5 mm.

Se preparó una cimbra de 60x60x20 cm para el colado de concreto, seguidamente se colocó aceite quemado, con objetivo de poder retirar la cimbra sin problema una vez curado el concreto. Dentro de la cimbra se armaron alambres de modo que fungieran como nervaduras y en medio de estas se colocaron los 4 prototipos fabricados, en su respectivo lugar, seguidamente se colocó alambre recocido de tal forma que cumplieran con la función de una malla electrosoldada con la cual se cubrieron los casetones (prototipos), una vez terminado de armar todo el sistema, se prosiguió a preparar el concreto para el vertido del mismo en la cimbra, se calculó y se dosificó,

Tabla 20: Materiales que se utilizaron para armar el sistema

los botes de arena, grava, cemento y agua para preparar un concreto de resistencia $f'c = 250 \text{ Kg / cm}^2$, así pues, se vertió en el sistema hasta cubrirlo 5 cm.



Ilustración 49. Prototipos (casetones) fabricados de 15x15x15 cm. los primeros dos de la izquierda fueron fabricados de cartón en trozos con micelio, los dos restantes corresponden a la mezcla de cartón machacado y micelio.

Terminado el colado se esperó un lapso de 15 días en lo que se curaba el concreto, durante este tiempo se regó de tal modo que se curara de buena manera, a los 3 días se descimbraron las fronteras, una vez transcurridos los 15 días de curado se procedió a voltear el sistema con todo el cuidado necesario a modo de verificar si los casetones (prototipos) fabricados habían soportado el sistema de armado, colado y la humedad sin sufrir fisuras o colapsos. A continuación, de manera fotográfica: el proceso de preparación, armado y colado que se siguió del sistema.



Ilustración 50. Proceso de preparación, armado y colado del sistema.



Ilustración 51. Proceso de colado y descimbrado de fronteras.

En la siguiente ilustración podemos verificar que los prototipos fabricados resistieron con éxito el sistema de prueba, visualmente no se aprecia alguna fisura o colapso de modo que el concreto haya invadido el sistema, al contrario, se aprecia que las redes miceliales se activaron de nuevo, este fenómeno se atribuye a la humedad del concreto, así como también se pueden apreciar otro tipo de micelios de un color turquesa que empezaron a invadir los prototipos, los cuales se confirmaron en las pruebas de microscopía.



Ilustración 52. Descimbrado y revisión de funcionalidad del prototipo fabricado.



Ilustración 53. Reactivación e invasión de agentes externos al prototipo.

Limitaciones de investigación

Uso de laboratorios: debido a los tiempos de maestría, aunado la pandemia, fueron factores que influyeron, para no acceder a laboratorios para las pruebas de solubilidad, biodegradación y absorción de humedad. No obstante, el procedimiento se reprodujo en un entorno similar a laboratorio con la interpretación de normas para poder llevar a cabo las pruebas antes mencionadas.

Normatividad: derivado a la escasa información sobre el tema y debido que es un material novedoso: el cual explorar sobre su aplicación en la construcción, han hecho carecer de normas con las cuales evaluarlo, sin embargo, cabe recalcar que se refugió y se basó en normas similares a la aplicación final como referencia para la evaluación del prototipo.

Económica: si bien los recursos otorgados por CONACYT para el financiamiento de la investigación fueron de gran apoyo, hace falta mayor inyección de recursos para realmente continuar y llevar a cabo la validación del sistema junto al prototipo a nivel piloto comercial.

Si bien esto podría ser un gran avance para así mismo empezar a elaborar normas con las cuales evaluar el micelio en la construcción.

Tiempos de maestría: el tiempo disponible para investigar un material novedoso y sin muchas referencias ni estudios previos o similares, es muy limitado en 2 años (duración de la maestría), así mismo las propiedades a estudiar del material son muchos, por mencionar algunos, cuestiones acústicas, inflamabilidad, etc.

119t

25t

39t

49t

59t

91t

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN
DE RESULTADOS

109t

209t

309t

409t

509t

Se evalúa si son admisibles los resultados obtenidos de los ensayos, teniendo en cuenta la aplicación final del producto.

Humedad - Densidad

La pérdida de humedad en promedio para los cuatro grupos fue alrededor del 50%, el más bajo siendo de 49% mientras que el más alto fue de 52% con una desviación estándar de 0.028 en el caso del grupo FG1 siendo el más bajo, mientras que el más alto fue para el grupo CG1 de 0.077%.

Para las pruebas de compresión en cuando a la densidad promedio es de 296.85 kg/m³ con una desviación estándar de 27 kg/m³ para el grupo CG0, en el caso del grupo CG1 la densidad promedio fue de 273.65 kg/m³ con una variación estándar de 42.51 kg/m³.

Para el caso de los especímenes para la prueba de flexión, el grupo FG0 presentó una densidad promedio de 345.00 kg/m³, con desviación estándar de 33.17 kg/m³, en el caso del grupo FG1 el promedio fue de 370.00 kg/m³ muy similar al otro grupo y la desviación estándar fue de 18.71 kg/m³.

Ensayo de compresión

Para la prueba de compresión analizando los grupos CG0 y CG1 tal como se puede apreciar en la tabla 21, que el grupo CG0 tiene mejores propiedades mecánicas respecto al CG1, en el módulo elástico, así como en el máximo esfuerzo y deformación.

Grupo	Ítem	Módulo Elástico kPa	Máximo Esfuerzo kPa	Máximo deformación	Resistencia a la compresión para una deformación del 5% (kPa)
CG0	Media	5193.477	159.368	15.54%	107.910
	Desviación Estándar	7495.19	68.3875	5.95%	56.54
CG1	Media	2043.498	121.591	8.48%	96.430
	Desviación Estándar	848.910	26.8939	2.28%	32.48

Tabla 21: Valores de las propiedades mecánicas de compresión de los grupos CG0 y CG1.

Ensayo de flexión

Caso similar al anterior, analizando los grupos FG0 y FG1 tal como se puede apreciar en la siguiente tabla, que el grupo FG0 tiene mejores propiedades mecánicas respecto al FG1 el cual consta de micelio y cartón en trozos, el grupo CG1 consta de cartón machacado y micelio.

Grupo	Ítems	Modulo Flexión Esfuerzo 20 -100 (kPa)	Esfuerzo 2 % (kPa)	Desplaza- miento 2 % (mm)	Deforma- ción 2 % (%)	Máximo Esfuerzo (kPa)	Máxima De- formación (%)
FG0	Media	5097.984	216.756	3.461	6.489	254.622	10.510
	Desvia- ción Estándar	1374.53	51.1027	0.60745	1.13884	46.5396	4.05895
FG1	Media	11.614	153.566	1.805	3.384	178.185	2.205
	Desvia- ción Estándar	3.76989	69.4422	0.27943	0.52348	83.2381	0.71541

Tabla 22: Valores de las propiedades mecánicas de flexión de los grupos FG0 y FG1.

Ensayo de absorción de agua.

A las 2 horas de inmersión el peso de los especímenes había aumentado al 50% para el grupo A0, mientras que para el grupo A1 había aumentado cerca del 90%, pasando las 4 horas el grupo A0 había aumentado su peso al 100%, mientras que el grupo A1 era casi nulo el aumento, pasando las 24 horas el grupo A0 aumentó su peso al 150% caso contrario al grupo A1 que aumentó escasos 2 gramos en promedio.

El cambio de peso de los especímenes refleja la capacidad de absorción de las mismas, y la diferencia de absorción de cada grupo se debe probablemente por el acomodo de las fibras del cartón ya que en uno fue en trozos (grupo A0), en otro machacado (A1), y esto pudo haber condicionado la forma de invasión del micelio. De acuerdo a interpretación de la norma ASTM D 570 al ser un material no homogéneo, como por ejemplo formas laminadas, la tasa de absorción de agua puede ser muy diferente a través de cada borde y superficie esto en el caso de la presentación del cartón en trozos. Incluso para materiales por lo demás homogéneos, puede ser un poco mayor a través de los bordes cortados que a través de las superficies moldeadas.

Además, las diferentes formas de presentación de cada espécimen (en trozos y machacado) comprometen la forma de invasión del micelio en cada poro, la absorción de agua no parece ser un grave problema debido a que en primera instancia el material biocompuesto flotaba sobre el agua, lo que indica que es menos denso, razón por la cual se tuvo que utilizar de apoyo otros elementos con las cuales sumergirlo en el agua, de la misma manera se valoró y no se tuvo reporte de ninguna deformación, agrietamiento o cambio en el aspecto de las muestras. Así mismo esto se probó en la validación de prototipo donde se demostró que el elemento soporta el colado de concreto sin sufrir agrietamiento ni colapso alguno, por cuestiones de absorción de agua.

Ensayo de solubilidad

Se tenía la hipótesis de que al momento de secar los especímenes en horno a 100°C. el micelio estaba totalmente inactivo, pero este ensayo demuestra lo equivocado de la hipótesis, por lo visto solamente entró en un proceso de hibernación, y sólo era cuestión de tener las condiciones necesarias para activarse nuevamente en este caso la humedad, lo que demuestra que se sigue el ciclo cerrado de reintegrarse a la naturaleza después de ser utilizado.

Los especímenes fueron ganando peso y el color del agua fue cambiando hasta tornar en color oscuro, así mismo empezó a desprender un olor desagradable, al momento de retirar los especímenes se verificó que presentaban cierta viscosidad, indicios claros de que el espécimen es soluble.

Ensayo de biodegradación

Los resultados demuestran que la composta tiene la capacidad de biodegradar este material esto debido a que presenta varios indicadores, tales como el cambio de apariencia, disminución de peso, aparición de poros, todos estos elementos indican que el prototipo vuelve al ciclo cerrado que se busca seguir para reintegrarse a la naturaleza.

Ensayo de microscopía

Los ensayos de microscopía demostraron que el material es capaz de reactivarse con las mínimas condiciones de humedad, además de que no sufre ningún tipo de daño que podría haber ocasionado las propiedades contenidas por el concreto.

No obstante, son primeras aproximaciones muy alentadoras, que incitan a continuar con la investigación.

Validación de prototipo

Se demostró en un ambiente simulado, fuera de laboratorio, recreando todas las condiciones necesarias que el prototipo resiste el colado y curado del concreto en 15 días, sin sufrir fisuras ni deformaciones, esto reafirma que puede ser una buena alternativa para suprimir el uso del poliestireno expandido en la construcción.

Sin embargo, también se descubrió que el micelio se reactiva nuevamente al entrar en contacto con la humedad del concreto, como se ha mencionado anteriormente se demuestra que el elemento sigue un proceso circular para reintegrarse nuevamente a la naturaleza, ahora en el otro sentido, al activarse el micelio bien podría reutilizarse el prototipo en otro colado, siempre y cuando se desmolde sin sufrir alguna fisura ya que al estar húmedo se debilita o se pandea, como también estudiar que tan viable es la misma al ser invadido por patógenos externos.

Para clarificar la discusión, se responde a continuación una pregunta clave, que somete la hipótesis de la investigación.

¿El material objeto de estudio cumple los valores mínimos de flexión y compresión exigidos al EPS por la NMX-C-137-ONNCCE-2010?

Comparación con EPS

Para el sometimiento y prueba de la hipótesis de esta investigación, se cotejan los resultados obtenidos con los parámetros mínimos establecidos por la **NMX-C-137-ONNCCE-2010**, respecto a la resistencia mínima a la flexión y compresión para una deformación del 5%.

En lo que respecta a la prueba de compresión se buscaba que los especímenes soportarán mínimo 16 kPa al 5 % de deformación y 18 kPa al 10% de deformación en vista de los parámetros establecidos en la norma **NMX-C-137-ONNCCE-2010**, como se ha visto anteriormente para el grupo CG0 la media soportada al 5% de deformación fue de 107.910 kPa mientras que para el grupo CG1 la media fue de 96.430 kPa dichos resultados están muy por encima del mínimo esperado, situándolo entre la resistencia mínima de un EPS 18 para el grupo CG1 y EPS 20 para el grupo CG0. Conviene subrayar, la falla promedio ocurrió alrededor del 6% de deformación para el grupo CG0 mientras que el grupo CG1 de manera similar lo hizo en promedio al 6%.

Por lo que se refiere a los ensayos de flexión se buscaba una resistencia mínima de 55 kPa el cual está establecido para un EPS 10, como se ha visto, es necesario recalcar que para el grupo FG0 la media soportada fue 254.622 kPa mientras que para el grupo FG1 fue de 178.185 kPa, lo cual indica que cumplen muy por encima de lo mínimo establecido, con estos resultados se puede ubicar al prototipo de micelio entre el EPS 22 para al caso del FG0 y el EPS 18 para el FG1.

Parámetro	Unidades	EPS 10	EPS 12	EPS 15	EPS 18	EPS 22
Densidad mínima	kg/m3	8	12	15	18	22
Resistencia mínima a la flexión	kPa	55	70	173	208	240
Resistencia a la compresión						
Resistencia mínima a la compresión para una deformación del 1 %	kPa	7	15	25	40	50
Resistencia mínima a la compresión para una deformación del 5 %	kPa	16	35	55	90	115
Resistencia mínima a la compresión para una deformación del 10%	kPa	18	40	70	110	135

Tabla 23: Especificaciones para la espuma rígida de EPS de acuerdo a **NMX-C-137-ONNCCE-2010**.

The image shows a highly textured, porous material with a mottled appearance of brown and white. The texture is irregular and fibrous, resembling a biological specimen like a piece of wood or a natural material, or perhaps a piece of handmade paper. The lighting is somewhat uneven, highlighting the intricate details of the surface. In the center of the image, the word "CONCLUSIONES" is written in a bold, black, serif font.

CONCLUSIONES

Desde el desarrollo de la investigación teórica, la experimentación, mezcla, obtención del prototipo y los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio son muy alentadoras y esto motiva a seguir explorando con más detalle el material objeto de estudio, más adelante. A continuación, se exponen los puntos más destacados.

Aportación del micelio a la resistencia mecánica

La aportación de la resistencia mecánica en cuando a compresión y flexión se refiere, nos dan conocimiento de las fuerzas exteriores e interiores del prototipo fabricado, como se ha visto, conviene subrayar que los resultados obtenidos son mucho mayores al mínimo esperado, los mejores resultados se obtienen con la mezcla de micelio y cartón en trozos no obstante en la validación de prototipo se demostró que las dos variables soportan el colado y curado de concreto, esto podría responder a la forma de invasión del micelio en cada caso.

Destacar que el estudio de los materiales hechos a base de micelio es un campo bastante abierto y novedoso aún, en cuando a aplicaciones de materiales de la construcción me refiero, es necesario recalcar que tampoco cuenta con normas en las cuales basarse, esto quiere decir que todavía necesita de un periodo amplio de desarrollo para alcanzar la plena madurez.

Sustitución del EPS

Por lo que se refiere a los ensayos mecánicos y la validación del prototipo en un ambiente simulado, se demuestra que la mezcla de cartón y micelio, puede sustituir como una alternativa ante el uso del poliestireno expandido como aligerante en la construcción, los resultados de este estudio, han demostrado que, entre los requisitos exigibles a productos similares, el material objeto de estudio cumple los que a priori parecen más importantes. No obstante, se pretende seguir trabajando e investigando para mejorar el producto.

Materiales biológicos en la construcción

El micelio se ha experimentado bajo diferentes enfoques en la construcción y de diseño: tabiques, paneles estructurales, membranas aislantes, placas acústicas, resulta ser un excelente adhesivo con materiales naturales como el yute, cáñamo o madera o en este caso el cartón, evitando así el uso de resinas derivados del combustible fósil, tan perjudiciales para el medio ambiente.

Aunque todavía se encuentra en fase experimental, con las geometrías indicadas y ensambladas en combinación con otros materiales es posible y prometedor lograr mejores resultados, para así en un futuro implementar totalmente el uso de estos materiales en la construcción.

El micelio ha despertado mucho interés, en su uso como biocompuesto y más al reciclar con materiales que comúnmente son desechados, como el aserrín o cartón, por mencionar algunos ejemplos, como se adelantó, todavía no se ha alcanzado una fase de plena madurez en todos sus ámbitos, desde el método, junto a las distintas evaluaciones mecánicas, físicas, son un tema de estudio plenamente vigente.

Es de suma importancia que otros profesionales se sumen y aporten al conocimiento de esta tecnología, cabe recordar que aunque existen algunos datos de otras exploraciones estos se pueden tomar sólo como referencia ya que al ser un elemento vivo sus características varían desde la familia del reino fungí ya que además con él se explora, el sustrato que se utiliza, las condiciones de crecimiento de cada región, sólo por mencionar algunos de los elementos más importantes que

puedan variar conforme a las características que se puede dotar al elemento final.

Bibliografía

- Adamatzky, Andrew, Phil Ayres, Gianluca Belotti, y Han Wosten. 2019. "Fungal architecture.pdf". *International Journal of Unconventional Computing*, diciembre.
- Anón. 2021. "Informe de La ONU Sobre Contaminación Por Plásticos Advierte Sobre Falsas Soluciones y Confirma La Necesidad de Una Acción Mundial Urgente". *UN Environment*. Recuperado el 3 de abril de 2022 (<http://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>).
- Anón. s/f-a. "Circular economy introduction". Recuperado el 27 de octubre de 2022 (<https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>).
- Anón. s/f-b. "Fungal Futures - Growing Domestic Bio - Landscapes". *Fungal Futures*. Recuperado el 17 de diciembre de 2020 (<http://www.fungal-futures.com/>).
- Anón. s/f-c. "Informe del Medio Ambiente". Recuperado el 1 de enero de 2021 (<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>).
- Appels, Freek V. W., Serena Camere, Maurizio Montalti, Elvin Karana, Kaspar M. B. Jansen, Jan Dijksterhuis, Pauline Krijgsheld, y Han A. B. Wösten. 2019. "Fabrication Factors Influencing Mechanical, Moisture- and Water-Related Properties of Mycelium-Based Composites". *Materials & Design* 161:64–71. doi: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.
- Askeland, Donald. 2012. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: Ciencia e ingeniería de los materiales.
- Attias, Noam, Ofer Danai, Tiffany Abitbol, Ezri Tarazi, Nirit Ezov, Idan Pereman, y Yasha J. Grobman. 2020. "Mycelium Bio-Composites in Industrial Design and Architecture: Comparative Review and Experimental Analysis". *Journal of Cleaner Production* 246:119037. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119037.
- Campbell, F. C. 2010. "Introduction to Composite Materials.Pdf".
- Chiavenato, Idalberto, y Arão Sapiro. 2017. *Planeación estratégica: fundamentos y aplicaciones*. México, D.F: McGraW-Hill Education.
- Cigarroa Espinosa, Christian Ivett. 2017. "Biocompositos (materiales de residuos urbanos aplicados a la arquitectura)". Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Díaz García, Arturo Emmanuel. 2019. "Material compuesto para arquitectura a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12k twill". Universidad Nacional Autónoma de México.
- Díaz García, Arturo Emmanuel. s/f. "Material compuesto para arquitectura a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12k twill".

- Elsacker, Elise, Asbjørn Søndergaard, Aurélie Van Wylick, Eveline Peeters, y Lars De Laet. 2021. "Growing Living and Multifunctional Mycelium Composites for Large-Scale Formwork Applications Using Robotic Abrasive Wire-Cutting". *Construction and Building Materials* 283:122732. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122732.
- Faruk, Omar, Andrzej K. Bledzki, Hans-Peter Fink, y Mohini Sain. 2012. "Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000–2010". *Progress in Polymer Science*, noviembre, 1552–96.
- Gruber, Petra, y Barbara Imhof. 2017. "Patterns of Growth—Biomimetics and Architectural Design". *Buildings* 7(4):32. doi: 10.3390/buildings7020032.
- Heisel, Felix, y Dirk E. Hebel. 2019. "Pioneering Construction Materials through Prototypical Research". *Biomimetics* 4(3):56. doi: 10.3390/biomimetics4030056.
- Hernández Miranda, Berenice. 2014. "Un sistema de información para estrategia de planeación participativa: un ejemplo de aplicación." UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Katz, Ariel Marcelo. 2020. "Emprender en negocios de la economía circular: el caso BYOS". *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación* (114). doi: 10.18682/cdc.vi114.4118.
- López Oliva, Alejandra Paola. s/f. "Compuesto de celulosa - poliestireno y celulosa - polipropileno elaboración y caracterización". Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- Martínez González, Triana. 2020. "Material bio-compuesto". Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- McDonough, William, y Michael Braungart. 2005. *Cradle to cradle (De la cuna a la cuna)*. España: Mc-Graw-Hill.
- Mijangos, Carmen, y José Serafín Moya. 2017. *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*. Consejo superior de investigaciones científicas colección divulgación. Madrid.
- Newell, James. 2011. *Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería*. México, D.F.: Alfaomega.
- Ochoa, Natalia, y Pablo Domínguez. s/f. "Estudio sobre la evaluación y análisis de las características físico-mecánicas y apreciativas de un biopolímero conformado de micelio de hongo ostra y desechos de mimbre." Universidad de Chile.
- Pauli, Gunter. 1999. "Volver a AdamSmith.pdf". diciembre.
- Ramos Riascos, Carlos Daniel, y Juan Carlos Caro Vives. 2014. "Biocompuestos en Colombia. Aportes de Diseño en la aplicación de Biocompuestos en el contexto productivo colombiano". *MasD Revista Digital de Diseño* 8(15):24. doi: 10.18270/masd.v8i15.119.
- Rodríguez Jara, Sebastián. 2016. "Mycelium-material biobasado, compuesto del micelio del hongo trametes versicolor y cáscaras de nuez juglans regia". Universidad de Chile, Chile.

- Rodríguez, Sebastián. 2018. "Material biobasado compuesto por el micelio de hongos descomponedores de madera y residuos agroindustriales". *RChD: creación y pensamiento* 3(5). doi: 10.5354/0719-837X.2018.50632.
- Román-Ramos, J. D., F. J. Luna-Molina, y L. J. Bailón-Pérez. 2014. "Encofrado perdido constituido por paja cohesionada con micelio como sustituto del poliestireno expandido". *Informes de la Construcción* 66(Extra-1):m006. doi: 10.3989/ic.13.097.
- Ruiz, Mariana, Karla Pastor, y Adriana Acevedo. 2013. "Biodegradabilidad de Artículos Desechables en un Sistema de Composta con Lombriz". *Información tecnológica* 24(2):47–56. doi: 10.4067/S0718-07642013000200007.
- Soh, Eugene, Zhi Yong Chew, Nazanin Saeidi, Alireza Javadian, Dirk Hebel, y Hortense Le Ferrand. 2020a. "Development of an Extrudable Paste to Build Mycelium-Bound Composites". *Materials & Design*, octubre, 109058.
- Soh, Eugene, Zhi Yong Chew, Nazanin Saeidi, Alireza Javadian, Dirk Hebel, y Hortense Le Ferrand. 2020b. "Development of an Extrudable Paste to Build Mycelium-Bound Composites". *Materials & Design* 195:109058. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109058.
- United Nations Environment Programme. 2018. *Single-use plastics, a roadmap for sustainability*.
- Vallejos, María Evangelina, Fabiola Vilaseca Morera, José Alberto Méndez González, Universitat de Girona, y Agrària i Tecnologia Agroalimentària Departament d'Enginyeria Química. 2006. "Aprovechamiento integral del cannabis sativa como material de refuerzo/carga del polipropileno". Universitat de Girona, Girona.
- V.W. Appels, Freek, Serena Camere, Maurizio Montalti, Elvin Karana, y Kaspar M.B. Jansen. s/f. "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related.pdf".
- Wechsler, Andrea. 2018. "Materiales, diseño y sustentabilidad". *RChD: creación y pensamiento* 3(5). doi: 10.5354/0719-837X.2018.51684.
- Xing, Yangang, Matthew Brewer, Hoda El-Gharabawy, Gareth Griffith, y Phil Jones. 2018. "Growing and Testing Mycelium Bricks as Building Insulation Materials". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, febrero, 022032.