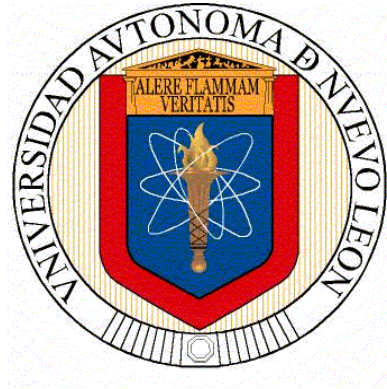


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**PROPUESTA SUSTENTABLE PARA LA CONSTRUCCIÓN
USANDO BLOQUES DE CONCRETO VEGETAL CON
BIOAGREGADOS DE LECHUGILLA, ESTUDIO DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO AISLANTE**

POR

ING. GERARDO AHARÓN GARCÍA LARA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN MATERIALES DE CONTRUCCIÓN**

FEBRERO 2026

Índice de Contenido

CAPITULO 1	1
1. Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema.	3
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis.	6
1.4 Objetivo general.	6
CAPITULO 2	8
2. Antecedentes.	9
2.1 Desarrollo sostenible.....	9
2.2 Composición química de diversos bioagregados.	9
2.3 Composición química de diversos bioagregados.	9
2.4 Investigación de diversos métodos para la eliminación de sustancias solubles.	10
2.5 Evaluación de las propiedades del concreto usando bioagregado de cascara de arroz.....	12
2.6 Efecto en el curado del concreto al usar bioagregados.	13
2.7 El cáñamo en la construcción.	13
2.8 Una revisión sobre la adopción del bloque aislante/eco-bloque como tecnología de construcción ecológica desde el punto de vista social.	14
2.9 Determinación de un bioagregado.	16
2.10 Marco teórico.....	16
2.10.1 Lechuguilla.	16
2.10.2 Celulosa.	17
2.10.3 Hemicelulosa.....	17
2.10.4 Lignina.	17
2.10.4 Ceras y pectinas.....	17
2.10.5 Bioagregados.	18
2.10.6 Bloque orgánico.....	18
2.10.7 Aislamiento térmico.....	18

2.10.8 Conductividad térmica.	18
2.10.9 Densidad.	19
2.10.10 Hidrosolubles.	19
CAPITULO 3.	20
3. Metodología.	21
3.1 Obtención de la materia prima.	21
3.1.1 Extracción y preparación.	21
3.1.2 Tratamiento hornificación.	22
3.2 Metodología detallada para la Caracterización Química.	22
3.2.1 Análisis de la humedad (TAPPI T264 cm-97).	22
3.2.2 Análisis de cenizas a 525°C (TAPPI T211 om-93).	23
3.2.3 Extraíbles con etanol-tolueno (TAPPI T204 cm-97).	23
3.2.4 Contenido en lignina insoluble en ácido (TAPPI T222 om-98).	24
3.2.5 Contenido en holocelulosa (Método de Wise y col., [2]).	24
3.2.6 Determinación de α -celulosa y hemicelulosas (Método de Rowell [3]).	24
3.3 Caracterización del bioagregado de lechuguilla durante las diferentes etapas de hornificación.	25
3.3.1 Caracterización morfológica superficial mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).	25
3.3.2 Análisis de la Estructura cristalina y fases por Difracción de Rayos X (DRX).	26
3.3.3 Determinación de la composición elemental mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).	26
3.3.4 Caracterización de grupos funcionales y estructura molecular mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).	27
3.3.5 Evaluación de la estabilidad térmica y composición de fases mediante Análisis Termogravimétrica (TGA).	27
3.4 Metodología detallada para la Recomendación del RILEM TC 236-BBM.	28
3.4.1 Procedimiento de muestreo.	28
3.4.2 Determinación del contenido de agua inicial.	28
3.4.3 Determinación de la absorción de agua por inmersión.	29

3.4.4 Determinación de la densidad aparente seca.	29
3.4.5 Determinación de la distribución del tamaño de partícula por tamizado.	30
3.5 Diseño experimental para morteros con bioagregado de lechuguilla.	30
3.5.1 Probetas cubicas (5x5x5cm).	31
3.6 Metodología para la elaboración de bloques orgánicos.	32
3.6.1 Bloques orgánicos (15x20x40cm).	32
3.6.2 Estudio de propiedades térmicas (Hot box).	33
3.6.3 Ensayo de resistencia a la compresión.	34
CAPITULO 4.....	35
4. Resultados y Discusión.	36
4.1 Caracterización Química.	36
4.1.1 Análisis de la humedad.	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Figura 1. El 6% de la población solo cuenta con un aislamiento térmico en sus hogares. (INEGI, 2020).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Conductividad térmica de la mezcla de concreto con los diferentes métodos (Rosas, 2021).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Campos de lechuguilla en su estado natural en Icamole, García, Nuevo León.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Bioagregado de lechuguilla seco, previo al tratamiento de hornificación.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La industria de la construcción tiene un gran impacto ambiental debido a su alta demanda por recursos naturales, así como, por el consumo de energía que generan gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con la información que presenta la Agencia Internacional de Energía (AIE), la industria de la construcción y de edificios representan un 36% del uso de energía a nivel mundial y un 40% en generación de emisiones de CO₂ (IAE, 2023).

El objetivo No. 9 de desarrollo sostenible propuesto en el 2015 por la ONU, menciona el construir infraestructuras resilientes, promoviendo la sostenibilidad y fomentando las innovaciones en el sector de la construcción. El concepto de construcción sostenible nace en 1980, con el propósito de reducir los residuos generados por la construcción, al minimizar el uso de recursos naturales, prevenir la contaminación y afectar lo menos posible al medio ambiente (Martínez, 2022).

Dentro del desarrollo de construcción sostenible, se han implementado diferentes tipos de materiales (poliméricos, zeolita, ceniza volante, escoria de alto horno, entre otros, como los de origen biológico). Con respecto a la implementación de bioagregados, existen diferentes investigaciones científicas usando, la cascara de cacahuete, el cáñamo, el agave, el sargazo, así como el uso de la lechuguilla en matrices cementantes (Núñez, 2023).

En el desarrollo de materiales alternativos de construcción en México, se busca implementar nuevos materiales de origen biológico como el de la lechuguilla en la región de Nuevo León, al cual se le puede dar un uso como agregado. La lechuguilla es usada en comunidades marginadas alrededor del área metropolitana para hacer escobas, trapeadores e incluso sogas. La alternativa propuesta es utilizar la planta de la lechuguilla como bioagregado para la elaboración de bloques orgánicos base cemento portland.

Estudios demuestran que los bioagregados tienen propiedades como la baja densidad, el aislamiento térmico y acústico, lo cual permite regular una temperatura ambiental interna en vivienda, reduciendo el aumento térmico producido de la temperatura externa. Los bioagregados en su estado natural no se puede usar, esto

nos lleva a darle un tratamiento; estos tratamientos buscan eliminar los azúcares, sales y partículas orgánicas dentro de la composición biológica del bioagregado para mejorar su compatibilidad con el cemento portland. El método por usar es el de hornificación, consta de ciclos de lavado y secado del material, la extracción de compuestos hidrosolubles de la lechuguilla que no permiten una correcta homogenización en la matriz de la mezcla cementante.

Esta investigación pretende establecer las bases para la elaboración de bloques de concreto vegetal con bioagregados a base de lechuguilla y estudiar su comportamiento físico-mecánico y sus propiedades térmicas como un material aislante para su implantación en el desarrollo de viviendas dignas.

1.1 Planteamiento del problema.

Estudio realizado de la situación mundial de los edificios y la construcción de 2022 coincide con la última ronda de conversaciones en la conferencia de la ONU sobre el clima, la COP27, y concluye que el sector fue responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones de CO₂ asociadas a la energía y sus operaciones en durante 2021. Las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en las operaciones del sector alcanzaron un equivalente a los 10,000 millones de toneladas de dióxido de carbono, registro un 5% más alto que los niveles de 2020 y un 2% por encima del pico prepandémico de 2019. La demanda de energía para la calefacción, la refrigeración, la iluminación y el equipamiento de los edificios en 2021 aumentó cerca de un 4% respecto a 2020 y un 3% en relación con 2019 (Naciones Unidas, 2022).

Un desafío en la actualidad de México es la búsqueda de una vivienda digna, donde la implementación de aspectos sustentables y un equilibrio en el entorno son necesarios para ampliar las oportunidades de grupos vulnerables. Así mismo, se busca impactar en los materiales orgánicos, aprovechando sus propiedades que han sido investigadas en el suroeste de Inglaterra, donde el investigador Ntimugura *ET al.* Estudiaron las propiedades térmicas, higroscópicas y acústicas de diferentes biomateriales (Ntimugura, 2020).



Figura 1. El 6% de la población solo cuenta con un aislamiento térmico en sus hogares. (INEGI, 2020).

Una vivienda digna tiene como principales características el disponer de servicios, materiales, instalaciones e infraestructura. Observando la figura 1, la demanda en el uso de mampostería es del 92% en México. Por eso mismo, al brindar un bloque aislante con el uso de los bioagregados, donde al usarlo en elementos secundarios o de separación, estos bloques brindan un mejor confort al regular las temperaturas de los hogares.

La lechuguilla al ser una materia prima abundante en la región Noreste de México y ser un familiar del agave, como se ha observado en investigaciones (Martínez, 2013). El uso de la lechuguilla al sustituir un agregado calizo mejora las propiedades térmicas compromete la resistencia a cargas por tener una menor densidad. La incorporación de bioagregados en la elaboración de bloques de concreto puede ser una alternativa orgánica. Buscando una aplicación como un material de construcción, teniendo la visión de ser usado en muros de viviendas para mejorar el confort. Al tener propiedades aislantes podrá mantener las habitaciones del hogar aisladas de la temperatura del exterior, ayudando a usar menor energía eléctrica para mantener una temperatura agradable. Como es el caso de los climas acondicionados o así mismo de calefacciones en la temporada de invierno, los cuales tienen una demanda energética alta en la actualidad.

La incorporación de la lechuguilla como bioagregado no es compatible en su estado natural. Por eso mismo, al usar el tratamiento de hornificación se eliminarán dichos solubles y materia orgánica que contienen, los cuales no permiten una compatibilidad en la matriz del cemento portland. Al ser el cemento portland el más usado en el mundo, se brindará un bioagregado para la elaboración de bloques con la sustitución parcial del agregado convencional. Aprovechando las propiedades físicas, aislantes y con una resistencia mecánica óptima. Dando paso a la búsqueda de cementantes alternativos incorporando con bioagregados. Con el método de hornificación se asegura una mayor durabilidad a la mezcla cementante ya que, se elimina la materia orgánica la cual provoca una descomposición en el material. Así mismo el método de hornificación al poner el bioagregado a temperaturas y lavados hacen que su estructura se rompa y pueda liberar los solubles en los lavados con el agua.

1.2 Justificación.

El reto de la investigación consiste en la elaboración de bloques de concreto vegetal, estudiando el aislamiento térmico que pueden llegar a obtener, así como ensayos del comportamiento físico-mecánico. Los principales beneficiarios serán las personas de grupos vulnerables, buscando el uso de materiales alternativos dentro del hogar, ayudándolos a tener una vivienda digna y sostenible. Donde la reducción de consumo de energías en sus hogares se podrá apreciar, así como la protección de las temperaturas al exterior del hogar. Será el primer bloque orgánico de la región en el noreste de México con la vegetación local (lechuguilla), obteniendo una mezcla al incorporar ceniza volante la cual ayudará a reducir el cemento portland. El diseño de mezcla adicionara la ceniza volante; aportara una mejor homogenización de la mezcla. Para mejorar las propiedades del agregado vegetal, se tratará por el método de hornificación, aumentando los vacíos dentro del bio agregado al retirar compuestos orgánicos y azúcares. Las principales propiedades físicas beneficiadas son el aislamiento térmico, acústico y su capacidad para la retención de la humedad.

Se busca impactar dentro de diferentes viviendas convencionales, usándose en muros de separación para darles un uso a estos bloques sin una alta demanda de cargas mecánicas, y que se logren observar las cualidades que busca reducir la energía en los hogares, así como aislar las temperaturas del interior con el exterior. Al ser una alternativa de aislamiento térmico, se espera que en comunidades marginadas donde no se tenga acceso eléctrico, se pueda tener un confort en sus hogares. El principal aporte científico es estudiar las materias vegetales como bioagregados e incorporarlos en la matriz cementante como se suelen usar los materiales calizos; siendo así una alternativa a los materiales de construcción convencionales. Así mismo dar pie a investigaciones de cementantes alternativos con incorporando bioagregados con materia orgánica de diferentes regiones.

1.3 Hipótesis.

Los bloques de concreto vegetal con una proporción optimizada de bioagregado de lechuguilla tendrán propiedades físicas como la densidad y aislamiento térmico mejoradas con respecto a los bloques de concreto tradicionales, además de un comportamiento mecánico adecuado para elementos secundarios y no estructurales cumpliendo con la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

1.4 Objetivo general.

Evaluar el comportamiento físico, térmico y mecánico de bloques de concreto con bioagregados de lechuguilla, con el fin de realizar una comparativa entre las proporciones del 0%, 25%, 50% y 75% de sustitución de agregado vegetal por el calizo.

1.5 Objetivos específicos

- Estudiar la composición química de la lechuguilla mediante la norma TAPPI T 257 cm-85, TAPPI T264 cm-97, TAPPI T211 om-93, TAPPI T204 cm-97, TAPPI T222 om-98.
- Caracterizar la microestructura de la lechuguilla durante el tratamiento de hornificación por técnicas instrumentales como DRX en polvos, FRX por dispersión de energía, FTIR por transformadas de Fourier, SEM y TGA en el bioagregado.
- Evaluar las recomendaciones RILEM (distribución granulométrica, % humedad, % absorción y densidad) para un bioagregado en el uso de morteros cementantes.
- Aplicar un diseño de experimentos (DoE) para optimizar la matriz cementante con la sustitución del agregado fino por el vegetal, controlando sus factores (a/c, %Cv).
- Evaluar la resistencia mecánica de los bloques orgánicos con base en la normativa NMX-C-404-ONNCCE-2012 y comparar los resultados con un bloque comercialmente disponible.
- Evaluar el comportamiento térmico de los bloques orgánicos con el equipo de resistividad térmica y comparar los resultados con un bloque comercialmente disponible.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

2. Antecedentes.

2.1 Desarrollo sostenible.

Las Organización de las Naciones Unidas menciona que el desarrollo sostenible implica modificar la manera de vivir organizada y proteger los recursos naturales para las futuras generaciones, así mismo satisfaciendo las necesidades del presente sin comprometer las generaciones futuras en tener un estilo de vida confortable. Esto nos plantea alternativas de construcción para viviendas y edificios reduciendo el impacto ambiental e incrementando la durabilidad es decir prolongar la vida útil de los materiales y edificaciones. "La supervivencia de nuestras sociedades y de nuestro planeta común pasa por un mundo más sostenible". (Naciones Unidas, 2023).

2.2 Composición química de diversos bioagregados.

Ntimugura junto a su equipo de trabajo hicieron una recopilación de datos relacionados sobre los estudios de los bioagregados. Obtuvieron que la composición química básica de los materiales lignocelulósicos (polisacáridos) da lugar a problemas de incompatibilidad relacionados con la absorción de agua de los grupos hidrófilos o con la filtración de sustancias químicas que interfieren en el fraguado y endurecimiento de los aglutinantes minerales. Se han desarrollado técnicas de tratamiento químicas, físicas y mixtas para abordar la compatibilidad de los agregados de biomasa y los ligantes minerales/orgánicos. El uso de soluciones alcalinas es la técnica más extendida y permite eliminar eficazmente la hemicelulosa y la lignina, así como mejorar las propiedades mecánicas y microestructurales. Sin embargo, la eficacia de estos tratamientos varía en cuanto a la reducción de la absorción de agua, la unión fibra-matriz y la mejora de la resistencia, y depende en gran medida de la naturaleza de la fibra vegetal (Ntimugura, 2020).

2.3 Composición química de diversos bioagregados.

De acuerdo con investigaciones de Carmona et al. (2017) y su equipo de trabajo publicadas en la revista mexicana de Ciencias forestales, la composición química

de la agave lechuguilla, presenta una distribución de polímeros estructurales y compuestos extraíbles; en su análisis de caracterización de la tabla 1, se determinaron los siguientes valores en porcentaje de base seca:

Tabla 1. Composición química de Agave lechuguilla Torr (Carmona, 2017).

Componente Químico	Composición (% base seca)
Celulosa	17.72 ± 0.68
Hemicelulosa	17.15 ± 0.91
Lignina soluble	3.64 ± 0.34
Lignina insoluble	3.68 ± 0.21
Cenizas	12.45 ± 0.88
Extractivos	45.34 ± 1.2

2.4 Investigación de diversos métodos para la eliminación de sustancias solubles.

Dentro de la investigación, el principal objetivo es el retiro de azúcares y otras sustancias químicas que tiene el agregado de origen vegetal. Se obtuvo la conductividad térmica de 0.5 W/mK en una mezcla cementante base agregado vegetal. El agregado vegetal utilizado fue Agave Salamina, donde se le dio el tratamiento de hornificación, el cual consta de someter al bioagregado a 10 ciclos; un ciclo consta de colocar el bioagregado 16 horas hornificación a 80°C, luego pasando por 3 horas sumergiendo el bioagregado en agua destilada donde se busca eliminar los solubles, repitiendo este proceso.

Conductividad térmica del concreto vegetal con los distintos tratamientos de la fibra

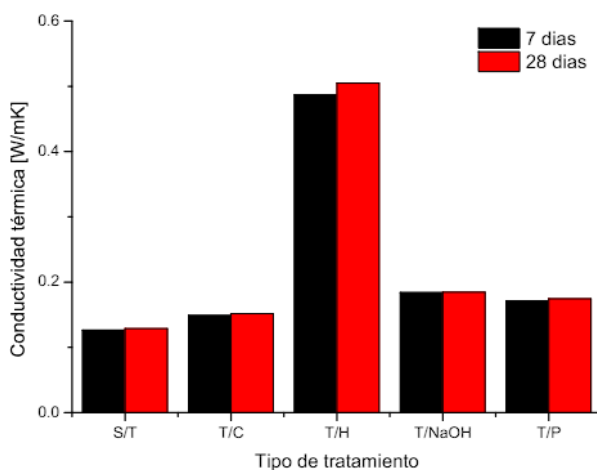


Figura 2. Conductividad térmica de la mezcla de concreto con los diferentes métodos (Rosas, 2021).

Basándonos en dichos resultados, se optará por el tratamiento de hornificación. Así mismo el equipo de investigación de Rosas obtuvo que el método de hornificación obtuvo mayor resistencia a la compresión. Buscando el cumplimiento mínimo en un bloque de mampostería que especifica la norma "NMX-C-404-ONNCCE-2012" (Rosas, 2021).

En la Tabla 2 se muestra las dosificaciones necesarias para la elaboración de especímenes para la mezcla con agregado vegetal con los diferentes pretratamientos del bioagregado (agave). Donde se usó el 30% de agregado vegetal y un 70% de pasta de cemento. Con la relación de agua/cemento de 0.35.

Tabla 2. Dosificación para la fabricación de mortero vegetal (Rosas, 2021).

Muestra	Agregado vegetal (g)	Agua de premezcla (g)	Cemento (g)	Agua de reacción (g)
S/T	46.6	21.8	546	191.1
T/Congelamiento	29.2	19.7	546	191.1
T/Hornificación	39.6	23.8	546	191.1
T/NaOH	52.2	23.1	546	191.1
T/Parafina	56.6	20.1	546	191.1

En el estudio de la hidratación del cemento portland se consideró la variación en los parámetros físicos y mecánicos de peso volumétrico, conductividad térmica y resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Estos parámetros se consideran variables de respuesta a la relación agua/cemento en 0.35 y 0.55; la incorporación de un aditivo super fluidificante en un 1% de la masa del agua de reacción y considerando un curado en agua saturada en cal y un curado en condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa (Rosas, 2021).

2.5 Evaluación de las propiedades del concreto usando bioagregado de cascara de arroz.

La actividad agroindustrial da lugar a una abundante generación de residuos, que constituyen una atractiva fuente de materiales para la sustitución de agregados pétreos. Estos materiales se conocen como bioagregados. El evaluar los bio-cementantes con bioagregados de arroz. Usando la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) en sustitución parcial al cemento al 8% (en masa), y se realizó la incorporación de cascarilla de arroz (RH) sustituyendo a la arena natural a niveles del 5% y 10%, en volumen. Se evaluó el comportamiento mecánico y térmico, así como algunas propiedades físicas, en comparación con un concreto de referencia (sin RH), a lo largo del tiempo y hasta 6 meses. Con base en los resultados, se encontró que la incorporación de HR produjo bio-cementante con un buen desempeño térmico debido a su menor densidad, a pesar de la reducción en las propiedades mecánicas y el aumento de los niveles de deformación plástica. Este estudio muestra el potencial de los bio-cementante colados con bioagregados procedentes de residuos de arroz para su aplicación en paneles o componentes aislantes para edificios (Amantino, 2022).

2.6 Efecto en el curado del concreto al usar bioagregados.

En el trabajo del investigador Dávila "Fibra natural de lechuguilla como agente de curado interno en concreto autocompactantes propiedades mecánicas, retracción y durabilidad" demostró ser un material eficaz para mejorar el curado interno en concreto de bajo contenido en agua/ligante y altas prestaciones. En la investigación obtuvo la absorción de agua (98%), velocidad de absorción (98% en 22 horas), velocidad de desorción (14%/día), la fibra natural de lechuguilla evaluada (Dávila, 2020). Con los datos recopilados de esta investigación, se tomará en cuenta el 98% de absorción del bioagregado para el diseño de mezcla. Así como con dicha agua retenida se perderá a lo largo de 7 días, beneficiando a la edad temprana de la reacción cemento/agua para obtener una mejor resistencia.

2.7 El cáñamo en la construcción.

Francia es pionero en la construcción de bloques con cáñamo, experimentos desarrollados por un auto constructor, llamado Carles Rossetti, y relacionados con la rehabilitación de su casa en Francia, buscó una alternativa más ligera y aislante a los materiales anteriores e hizo un relleno de mortero de cal con cáñamo entre una estructura antigua de entramado de madera. Esta idea ha sido tomada poco a poco por diversas empresas francesas y ha terminado en la comercialización de un granulado de cañamiza para morteros aislantes de cal y cáñamo o entramado de madera, solucionando las exigencias térmicas actuales sin afectar a la estructura, ni apariencia estética del edificio. Superando ciertas dificultades técnicas, el mortero aislante de cáñamo también área de investigación como material de construcción para la creación de industrias. Posee unas cualidades excelentes en cuanto a aislamiento térmico, con una conductividad térmica muy baja. Es además libre de nutrientes para parásitos, lo que ahorra tratamientos previos de cualquier tipo. Trabajar con morteros vegetales en la construcción es un reto nuevo que se está estudiando en diversas universidades europeas en cuanto a sus ventajas para el medioambiente y su comportamiento mecánico, térmico y bioclimático (Brümmer, 2014).

"El cáñamo industrial presenta una baja energía incorporada y una alta capacidad de aislamiento térmico, lo que lo convierte en un material clave para el cumplimiento de los estándares de Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) en la Unión Europea" (García & Muñoz, 2020).

En el continente asiático, las investigaciones de la Academia de Ciencias Agrícolas de Heilongjiang investigadores usan la fibra de cáñamo como refuerzo en matrices de cemento, destacando por no solo reducir el peso propio de elementos estructurales, si no que incrementa la resistencia al agrietamiento en un 25% en comparación con el concreto ligero convencional (Zhang, 2020).

La incorporación de fibras de cáñamo en matrices cementantes presenta desafíos entre el material vegetal y el aglomerante. En investigaciones desarrolladas por la Academia de Ciencias Agrícolas de Heilongjiang, el uso de fibras vegetales en estado crudo o sin procesar compromete la integridad del cemento portland debido a la presencia de compuestos orgánicos como la pectina, la hemicelulosa y la lignina. Estos biopolímeros actúan como agentes retardantes del fraguado del cemento y, debido a la naturaleza hidrofílica, eleva la absorción de agua de reacción en la mezcla cementante, lo que deriva en la degradación biológica (putrefacción) de la fibra dentro del bloque (Wang, 2018).

2.8 Una revisión sobre la adopción del bloque aislante/eco-bloque como tecnología de construcción ecológica desde el punto de vista social.

Las tecnologías de construcción ecológica (GBT) han cobrado un gran impulso como consecuencia de los problemas medioambientales, de gestión energética y sociales del sector de la construcción. El bloque aislante/eco-bloque es una GBT, que consiste en un material aislante que impide la entrada de aire caliente/frío en el interior de los edificios, conserva la energía y mejora el confort interior en comparación con el bloque convencional. Una falta de conocimiento sobre los materiales de construcción alternativos de origen biológico, así como la confianza sobre su resistencia son las principales barreras para el remplazo de materiales de construcción habituales (Joyram, 2022).

Las conclusiones de Portnov (2018) señalan que la escasa concienciación es el principal obstáculo que influye en la intención de aceptar la construcción ecológica y que esta falta de información genera una baja aceptación de los nuevos productos tecnológicos. Se argumenta que la cantidad de información sobre preocupaciones ecológicas, productos verdes, productos de ahorro de energía y conservación de la energía podría no ser discernida eficazmente entre las personas menos educadas (López, 2019). Los hogares podrían considerar la compra de viviendas ecológicas cuando se les proporcionara información más fiable y concreta (Zhang, 2016).

Dentro de la recopilación de la información sobre el uso de bioagregados en la construcción, se entiende que el uso de materia de origen orgánico tiene beneficios como el aislamiento térmico como material de construcción. Así mismo los bioagregados podrían brindar propiedades de aislamiento sonoro que va relacionado con su baja densidad. Los bioagregados requieren tratamientos para su incorporación en morteros cementantes. Al tener menor densidad en los bioagregados a un agregado calizo se espera una menor resistencia a la compresión, en su contra parte aumenta el aislamiento térmico. Así como sus variables es la cantidad de bioagregado en la sustitución del agregado fino de un bloque convencional. Para tener un diseño de mezcla óptimo donde se pueda usar como elemento estructural secundario y muros divisorios, donde se aislará la temperatura.

Así mismo, como se mencionó el uso de bioagregados depende de su naturaleza, se planea hacer un estudio biológico para conocer sus componentes orgánicos. Donde las principales pruebas a seguir serán las de TAPPI T 257 cm-85, TAPPI T264 cm-97, TAPPI T211 om-93, TAPPI T204 cm-97, TAPPI T222 om-98, Método de Wise, Determinación de celulosa y hemicelulosas. Obteniendo la holocelulosa, humedad relativa, extractos, entre otros componen necesarios para evaluar el bioagregado.

2.9 Determinación de un bioagregado.

Para clasificar la lechuguilla como agregado se realizarán las pruebas requeridas de caracterización física y química de RILEM protocolo TC-236-BBM. El trabajo del grupo estaba relacionado con el estudio de materiales de construcción fabricados a partir de partículas vegetales. La principal materia prima utilizada son partículas vegetales renovables, reciclables y fácilmente disponibles. Estas partículas se obtienen a partir del procesamiento de cáñamo, lino, miscanthus, pino, maíz, girasol, bambú y otras plantas (Amazine, 2017).

La primera prueba del TC-BBM publicada en el Informe sobre el estado de la técnica del Comité Técnico 236-BBM "Materiales de construcción a base de bioagregados" se llevó a cabo para comparar los protocolos utilizados por los distintos laboratorios para medir el contenido inicial de agua, la densidad aparente, la absorción de agua, la granulometría y la conductividad térmica. Mismo que se está realizando actualmente en los estudios biológicos de la lechuguilla y cumpliendo con el protocolo.

2.10 Marco teórico

2.10.1 Lechuguilla.

El agave de lechuguilla (subfamilia Agavoideae) es una planta típica de las zonas áridas y semiáridas de México. Habita en planicies y base de las montañas, sobre suelos sedimentarios arenosos (Germán, 1980). La lechuguilla ha sido usada como fuente de fibras naturales, desde hace por lo menos 8000 años, con el ixtle se han obtenido escobetas, redes, cestos, tapetes, brochas, relleno de muebles, bajo alfombras y cepillos industriales para aparatos de limpieza y pulido. La lechuguilla se considera de alta eficiencia fisiológica para el uso del agua, es decir, requiere bajos contenidos de humedad en el suelo para su desarrollo en poblaciones naturales (Nobel y Berry, 1985).

2.10.2 Celulosa.

Es el biopolímero lineal más abundante en la naturaleza. En la lechuguilla, su estructura es cristalina, constituye el esqueleto fibroso, proporcionando la resistencia mecánica y estabilidad estructural necesaria para soportar tensiones físicas (Carmona, 2017).

2.10.3 Hemicelulosa.

Polisacárido ramificado de naturaleza heterogénea y amorfa que rodea microfibrillas de celulosa. Actúa como la matriz de soporte y agente de acoplamiento. Es el componente más hidrofóbico, facilitando la absorción de humedad y la flexibilidad de la fibra (Carmona, 2017).

2.10.4 Lignina.

Macromolécula aromática compleja de estructura tridimensional, formada por unidades de fenilpropano. Funciona como un adhesivo hidrofóbico que rellena los espacios entre la celulosa y la hemicelulosa. Su función es otorgar rigidez, impermeabilidad y protección biológica contra la degradación enzimática y microorganismos (Carmona, 2017).

2.10.4 Ceras y pectinas.

Las pectinas son polímeros de ácido galacturónico que cementan las paredes celulares; las ceras son lípidos de cadena larga depositando en la superficie. Juntas, regulan la porosidad y adhesión de la fibra (Carmona, 2017).

2.10.5 Bioagregados.

Se conoce como bioagregado a toda materia que proviene de la naturaleza con origen biológico como es el caso de la lechuguilla. Un bioagregado basado en el RILEM ocupa pruebas de caracterización física y química.

2.10.6 Bloque orgánico.

Los bloques orgánicos son ladrillos de naturaleza orgánica sintetizados a partir de residuos orgánicos, residuos mineros y micelio producido por hongos. Los ladrillos ecológicos no son contaminantes, son respetuosos con el medio ambiente y tienen una mayor eficiencia (Kannan K, 2023). No se encontró una cantidad necesaria por cumplir para que un bloque se conoce como bloque orgánico, pero al contener algo de materia orgánica muchos le atribuyen este nombre.

2.10.7 Aislamiento térmico.

El aislamiento térmico es la capacidad para reducir la transmisión de calor entre dos espacio u objetos. Este depende de varios factores, incluidos la conductividad térmica, la densidad, la estructura del material, la humedad, el espesor del material, la temperatura y la radiación térmica. Los materiales con baja conductividad térmica, menor densidad y estructuras celulares cerradas suelen ser mejores aislantes. Además, mantener el material seco y aumentar su grosor puede mejorar su capacidad de aislamiento (Callister, 2020). El aislamiento térmico se mide en $W/(m^2 \cdot K)$ entre menor sea el número, aumenta la propiedad aislante.

2.10.8 Conductividad térmica.

La conductividad térmica es la capacidad de un material para transferir calor. Se mide en vatios por metro kelvin $W/(m \cdot K)$ en el Sistema Internacional de Unidades. Un material con alta conductividad térmica absorbe y pierde calor rápidamente,

mientras que un material con baja conductividad térmica es un mal conductor térmico (Nave, 2020).

2.10.9 Densidad.

Es la masa de material que existe por unidad de volumen, se calcula dividiendo la masa (m) de un objeto entre su volumen (V). La fórmula básica para calcular la densidad es: $\rho = m/V$. Cuando la densidad de un material es baja, las celdas de aire son más grandes, lo que implica un coeficiente de conductividad relativamente alto (Ondarse, 2024).

2.10.10 Hidrosolubles.

Un hidrosoluble es aquella materia orgánica, o químico, que se puede disolver en agua; el caso de la lechuguilla se observa una gran presencia de hidrosolubles, que van desde los azúcares, materia orgánica, minerales, entre otros. Los hidrosolubles son incompatibles con una matriz de cemento portland evitando el fraguado y la resistencia.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3. Metodología.

3.1 Obtención de la materia prima.

3.1.1 Extracción y preparación.

Se extrae la penca de lechuguilla de la región noreste de México, en García, Nuevo León. (Zona donde abunda de manera natural dentro del alcance para estudio). Con el uso de un pico se extrae la penca de manera tradicional por los ixtleros de la zona, la cual consiste en picar la raíz y extraer el corazón de la penca.



Figura 3. Campos de lechuguilla en su estado natural en Icamole, García, Nuevo León.

Para la preparación, remueven las hojas de la penca de lechuguilla para lavarlas y proceder al corte. Una vez lavada y separadas las hojas, se procede a cortar con tijeras y cúter cuadros de 0.5cm colocándolo en un recipiente de aluminio, para posteriormente pasarla al tratamiento de hornificación.



Figura 4. Lechuguilla preparada para la elaboración del bioagregado.

3.1.2 Tratamiento hornificación.

Para el tratamiento de hornificación, primero coloca el bioagregado dentro del horno a una temperatura de 60°C por 24h observando que se homogenice todo el bioagregado. Después se inician los ciclos de hornificación; un ciclo consiste en colocar el bioagregado en el horno a una temperatura de 80°C por 16h, esperar a que la masa tenga una temperatura ambiente y se sumerge en una cubeta con agua destilada cubriendo todo el agregado durante 3 horas. Este ciclo se repite hasta eliminar la presencia de solubles, el agua se torna café oscuro en las primeras lavadas dando señal que se están desprendiendo dichos solubles. Para el caso de la lechuguilla es un alrededor de 10 ciclos. Colocar en una cubeta o saco el bioagregado tapando el agregado.



Figura 5. Bioagregado de lechuguilla seco, previo al tratamiento de hornificación.

3.2 Metodología detallada para la Caracterización Química.

3.2.1 Análisis de la humedad (TAPPI T264 cm-97).

Para determinar la humedad en la lechuguilla se pesa una muestra de $2.00 \pm 0.01\text{g}$ en un recipiente previamente secado. Luego, la muestra se coloca en una estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24h. Tras el secado, las muestras se dejan enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador de sílica gel. Con la formula $(\text{Peso final} / \text{Peso inicial}) \times 100$ para obtener el % de humedad.

3.2.2 Análisis de cenizas a 525°C (TAPPI T211 om-93).

El ensayo se realiza con 1.00 ± 0.01 g de materia prima en equilibrio de humedad, colocada en un crisol de porcelana previamente tarado y libre de humedad la muestra se calcina en una mufla a 525°C durante 3h. Después de la calcinación, el crisol se enfría en un desecador con sílica gel. Una vez frío, se pesa la masa final. Se usará la formula $(\text{Peso final} / \text{Peso inicial}) \times 100$ obteniendo el % de ceniza.

3.2.3 Extraíbles con etanol-tolueno (TAPPI T204 cm-97).

Mediante este método se determina la cantidad de compuestos no volátiles extraíbles con disolventes orgánicos que presenta la materia prima, como ceras, grasas, algunas resinas, hidrocarburos no volátiles, carbohidratos de bajo peso molecular y algunas sales.

Para esta determinación, se utilizan 4.0 ± 0.1 g de muestra. La muestra se coloca en un cartucho de papel filtro previamente pesado. Sobre el cartucho con la muestra se coloca otro cartucho también pesado, ajustado como tapa para evitar pérdida de material durante el proceso de extracción. Luego, el conjunto se introduce en un sistema soxhlet, al que se añaden 150ml de una mezcla de etanol y tolueno (1:2 v/v), hasta alcanzar aproximadamente una sifonada y media. El soxhlet se conecta a un matraz y a un condensador, y se calienta a reflujo en una campana, llevando la mezcla a ebullición. Durante un máximo de 6 horas, se realizan al menos 24 ciclos de extracción. Al enfriar, el soxhlet se desmonta, y el disolvente del matraz se deja evaporar parcialmente en la campana a temperatura ambiente. El cartucho con la muestra se retira para análisis posteriores y se seca en estufa a 105°C durante 24 horas, hasta que el extracto esté completamente seco. Finalmente, se pesa para obtener la masa extraída. Usando la formula $(\text{Peso final} / [\text{Peso inicial} / \% \text{humedad}]) \times 100$ determinando el porcentaje de extraíbles.

3.2.4 Contenido en lignina insoluble en ácido (TAPPI T222 om-98).

El procedimiento consiste en pesar $1.0 \pm 0.1\text{g}$ de muestra sin compuestos extraíbles, preparada de acuerdo con la norma TAPPI T204 cm-97. A la muestra se le añaden 15ml de ácido sulfúrico al 72%, agitándola ocasionalmente durante 2h a temperatura ambiente. Luego, el contenido se vierte en un matraz de 1000ml, al que se le añaden 560ml de agua destilada. La mezcla se lleva a ebullición con reflujo durante 4 horas. La solución resultante se filtra usando un filtro número 3 previamente pesado y se enjuaga con agua caliente hasta alcanzar un pH neutro. El filtro se seca en una estufa a $100\text{-}105^{\circ}\text{C}$ por 24h. Después de este tiempo, el filtro se coloca en un desecador con gel de sílice para evitar que absorba humedad. Una vez frío, se vuelve a pesar el filtro. El porcentaje de lignina se determina mediante la fórmula $(\text{Peso final} / \text{Peso inicial}) \times 100$.

3.2.5 Contenido en holocelulosa (Método de Wise y col., [2]).

Para realizar este método, se inicia con $2.5 \pm 0.1\text{g}$ de muestras libres de extractos y secas (preparadas según la norma TAPPI T204 cm-97), colocadas en un matraz Erlenmeyer. Se añaden 80ml de agua destilada caliente ($70\text{-}80^{\circ}\text{C}$) y se sumerge el matraz en un baño termos atizado a 70°C , agitando regularmente con una varilla para homogenizar la mezcla. Luego, cada 60min, se agregan 0.5ml de ácido acético glacial y 2.6ml de clorito sódico al 25%, continuando el proceso durante 6-8h. Pasado este tiempo, la mezcla se mantiene en el baño 12h adicionales sin más adiciones. Al finalizar, el residuo sólido (holocelulosa) se filtra con un filtro número 2, se seca durante 24h en una estufa a 105°C , se enfría en un desecador y se pesa para determinar el %holocelulosa con la fórmula: $\text{Peso final} / \text{Peso inicial}) \times 100$.

3.2.6 Determinación de α -celulosa y hemicelulosas (Método de Rowell [3]).

Se pesan $2.00 \pm 0.01\text{g}$ de muestra de holocelulosa seca y libre de extractos, obtenida del sustrato mediante el Método de Wise y colaboradores. A la muestra se le añaden 10ml de NaOH al 17.5%, agitando hasta obtener una dispersión uniforme.

Luego, se agregan 5ml adicionales de NaOH al 17.5% cada 5min, sumando un total de 25ml en tres adiciones. Tras la última adición, la muestra se deja reposar 30min a 20°C, con un tiempo total de reacción de 4min. Luego, se incorporan 33ml de agua destilada a 20°C, mezclando bien, y se deja reposar una hora antes de filtrar en un filtro de porosidad media número 2. A continuación, el residuo sólido se lava con 100ml de NaOH al 8.3%, seguido de dos enjuagues adicionales con agua destilada. Posteriormente, se añaden 15ml de ácido acético al 10% y se deja reaccionar durante 3min antes de aplicar vacío. Finalmente, se lava con agua destilada hasta que el filtrado alcanza un pH neutro. La muestra se seca a 105°C, se enfría en un desecador y se determina gravimétricamente la α -celulosa, que corresponde a la fracción insoluble en el tratamiento. El porcentaje Alfa-celulosa se obtiene con $\text{Peso final} / \text{Peso inicial} \times 100$ y para el porcentaje de hemicelulosa es $\% \text{holocelulosa} - \% \text{celulosa}$.

3.3 Caracterización del bioagregado de lechuguilla durante las diferentes etapas de hornificación.

3.3.1 Caracterización morfológica superficial mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es una técnica crucial para visualizar la microestructura superficial de materiales sólidos como una resolución extremadamente alta. Se utiliza un equipo especializado llamada microscopio electrónico de barrido, el cual opera escaneando la superficie de la muestra con un haz de electrones enfocados. Estos electrones interactúan con los átomos de la muestra (bioagregado). El SEM permitirá observar detalles de la superficie de la fibra del bioagregado, la porosidad y diferentes características topográficas relevante. Esto es fundamental para entender como el tratamiento de hornificación a lo largo de los lavados influyendo directamente en las propiedades físicas y mecánicas del compuesto final. La preparación de la muestra será con un recubrimiento de oro-paladio.

3.3.2 Análisis de la Estructura cristalina y fases por Difracción de Rayos X (DRX).

La Difracción de Rayos X (DRX) es una técnica de laboratorio no destructiva indispensable para obtener información sobre la estructura cristalina, el tamaño de los cristales y la identificación de fases de un material. Empleando un difractómetro de rayos X, se dirige un haz de rayos X monocromático hacia la muestra, se difractan en ángulos específicos, siguiendo la Ley de Bragg. Un detector escanea estos ángulos, registrando la intensidad de los rayos X difractados. El patrón de difracción resultante, que muestra picos de intensidad a ángulos 2θ característico. Al comparar este patrón con bases de datos cristalográficas, es posible identificar los compuestos cristalinos presentes en el bioagregado. Para el estudio del bioagregado en sus diferentes fases durante el tratamiento, permitiendo comprender los cambios mineralógicos o estructurales que ocurren. Con el tratamiento de hornificación, puede revelar si hay alteraciones en la celulosa o la presencia de nuevas fases cristalinas que puedan influir en su comportamiento en la matriz cementante.

3.3.3 Determinación de la composición elemental mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

La Fluorescencia de Rayos X (FRX) es una técnica analítica elemental que permite determinar la composición química de una muestra de forma rápida y no destructiva. Se requiere un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, el cual irradia la muestra con un haz de rayos X de alta energía. Estos rayos X inciden excitan los átomos de la muestra, provocando que los electrones internos sean expulsados. Cuando un electrón de una capa superior cae para llenar el hueco, emite un rayo X característico con una energía específica para cada elemento. Será útil para determinar el porcentaje de elementos específicos, lo que puede indirectamente indicar la presencia y concentración de solubles que puedan afectar la hidratación del cemento o la compatibilidad con el bioagregado.

3.3.4 Caracterización de grupos funcionales y estructura molecular mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

La Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) es una herramienta analítica fundamental para la caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos, ya que permite identificar los grupos funcionales y la estructura molecular presentes en una muestra. Se utiliza un espectrómetro FTIR, el cual emite un haz de luz infrarroja que atraviesa la muestra. Los diferentes enlaces químicos y grupos funcionales de la muestra absorben la radiación infrarroja en frecuencias características. El espectrómetro detecta la intensidad de la luz transmitida o reflejada en función de la longitud de onda, generando un espectro que muestra picos de absorción en frecuencias específicas, cada pico corresponde a la vibración de un grupo funcional particular. Para el bioagregado, la FTIR será esencial para estudiar su estructura molecular en sus diferentes fases, especialmente antes y después del tratamiento de hornificación. Esto permitirá identificar cambios en los grupos de hidroxilo, lignina, hemicelulosa y celulosa, confirmando la eliminación de compuestos hidrosolubles y la modificación de la superficie de la fibra.

3.3.5 Evaluación de la estabilidad térmica y composición de fases mediante Análisis Termogravimétrica (TGA).

El Análisis Termogravimétrico (TGA) es una técnica que mide el cambio en la masa de una muestra en función de la temperatura o del tiempo, mientras esta se somete a un programa de calentamiento en una atmosfera controlada (aire). Se utiliza un termogravimétrico que consta de una balanza de precisión para monitorear la masa y un horno programable para controlar la temperatura. A medida que la muestra se calienta, los componentes volátiles o inestables se descomponen y se pierden, registrando una distribución en la masa. La curva resultante proporciona información sobre la estabilidad térmica del material, la temperatura de descomposición, y la composición cuantitativa de sus diferentes componentes.

3.4 Metodología detallada para la Recomendación del RILEM TC 236-BBM.

3.4.1 Procedimiento de muestreo.

Para las cumplir con las recomendaciones RILEM se requerirá una muestra representativa de al menos 1kg del bioagregado ya tratado. Se colocará el material en una superficie plana en forma de cono aplanando la punta, realizando un cuarteo en una superficie plana del círculo como se observa en la figura. Como se observa las partes opuestas se seleccionan y se repite la formación del cono, su aplanado y la división para seleccionar partes opuestas.

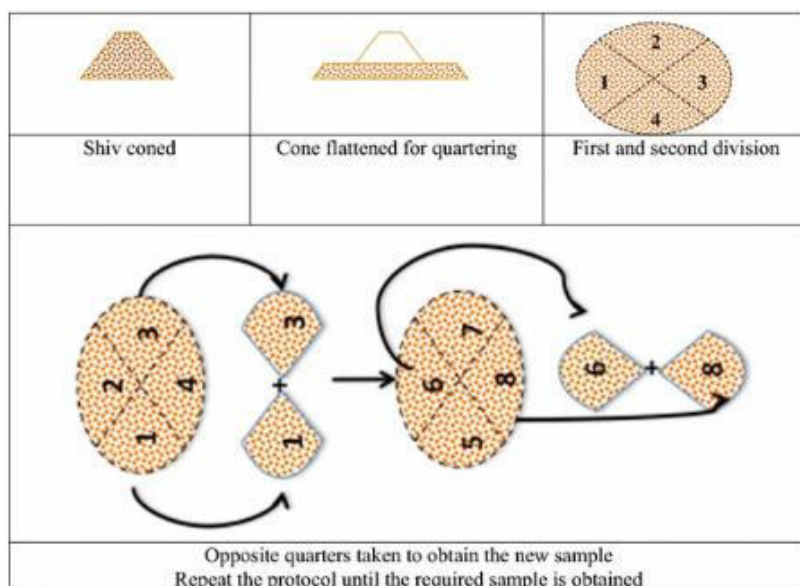


Figura 6. Esquema de muestreo y preparación del material bioagregado para caracterización, según las recomendaciones del RILEM TC 236-BBM.

3.4.2 Determinación del contenido de agua inicial.

Esta prueba nos permitirá conocer la cantidad de agua presente en el bioagregado. Se tomará una submuestra de 50g del bioagregado previamente muestreado. Esta submuestra se colocará en un horno de secado a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que la muestra alcance una masa constante. Una vez seca, se registra la masa seca (m_d). El contenido de agua se calcula como el porcentaje de la masa de agua respecto a la masa seca del material, es decir, $[(m_h - m_d)/m_d] \times 100\%$. Se

recomienda hacer un triplicado de prueba para asegurar la fiabilidad de los resultados.

3.4.3 Determinación de la absorción de agua por inmersión.

Esta metodología evalúa la capacidad del bioagregado para absorber agua cuando se sumerge. Inicialmente se toma la submuestra de 20g del bioagregado, secada en un horno a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se registra la masa seca (m_d). Se necesitará una malla para verduras, la cual se sumergirá en agua y pasará a un centrifugado de verduras para perder el agua superficial. El centrifugado es alrededor de 100 veces haciendo 2 giros por segundo. Al centrifugar la malla se tomará el peso y se registrará. Se coloca el bioagregado seco (20g) en la malla y se realiza la inmersión con una profundidad aproximada de 50mm por encima de la parte superior. En intervalos de tiempo predefinidos (1min, 15min, 4h, 24h, 72h), la malla (con bioagregado) se retira del agua se centrifuga para retirar el exceso de agua y se registra la masa de la muestra saturada restando el peso de la malla (m_s). La absorción de agua se calcula como el porcentaje de aumento de masa con respecto a la masa seca $[(m_s - m_d) / m_d] \times 100\%$. Se debe realizar un triplicado en las mediciones para cada tipo de bioagregado.

3.4.4 Determinación de la densidad aparente seca.

Esta prueba mide la densidad de un bioagregado cuando está completamente seco. Se utilizará un recipiente con forma de cilindro de un volumen conocido (V_c) y una submuestra de bioagregado. La muestra se seca previamente en un horno a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Una vez seca, se llena el recipiente cilíndrico con la muestra seca, asegurándose de que el llenado sea lo más homogéneo posible sin compactar excesivamente el material. Se pesa el bioagregado contenido en el recipiente (m_d). La densidad aparente seca (ρ_d) se calcula dividiendo la masa seca de la muestra por el volumen del recipiente (m_d / V_c). Para obtener un resultado preciso se recomienda hacer un triplicado.

3.4.5 Determinación de la distribución del tamaño de partícula por tamizado.

En esta prueba se utilizará para determinar la granulometría de un bioagregado. Se prepara una muestra seca como en los anteriores, aproximadamente de 100g. Esta muestra se coloca en la parte superior de una serie de mallas de tamizado previamente seleccionadas ($1/2$, $3/8$, $1/4$, No.4, No.5). El conjunto de mallas se somete a agitación manual durante un tiempo (10min). Después del tamizado, la masa de cada malla retenida se tomará el peso del material dependiendo su malla y la que pasa la No.5. La distribución del tamaño de partícula se expresa como el porcentaje en la masa de material retenido en cada malla o como el porcentaje acumulado que pasa o es retenido. Se recomienda realizar un mínimo de tres pruebas para cada muestra y registrar la masa en cada fracción para asegurar una precisión.

3.5 Diseño experimental para morteros con bioagregado de lechuguilla.

La elaboración de las mezclas de mortero que incorpora bioagregado de lechuguilla, demanda un enfoque metodológico para optimizar sus propiedades físico-mecánicas y térmicas. Para ello, se plantea un diseño de experimentación que permitirá evaluar el impacto de variables en la composición de los morteros. Este diseño experimental se centrará en la manipulación de los siguientes parámetros: el porcentaje de sustitución de bioagregado de lechuguilla, el porcentaje de ceniza volante (CV) como adición cementante suplementaria, y la relación agua/cemento (a/c). Los porcentajes y cantidades se justifica por la influencia en la trabajabilidad, la resistencia, la durabilidad y las propiedades térmicas.

El objetivo principal de este diseño experimental es cuantificar el efecto de las variaciones en estas proporciones sobre las propiedades finales del material compuesto. Se buscará determinar cómo estas variables impactan de manera interconectada la resistencia a la compresión, un parámetro crítico para aplicaciones estructurales, y las propiedades térmicas, esenciales para el rendimiento aislante de los bloques en viviendas dignas.

3.5.1 Probetas cubicas (5x5x5cm).

La experimentación se baso mediante un diseño de experimentos (DoE) de carácter multifactorial, analizando el efecto de tres variantes principales: el porcentaje de bioagregado, la relación agua/cementante (a/c) y contenido de ceniza volante. Para cada uno de los diseños de mezcla, la dosificación de los materiales se realizo estrictamente en volumen, garantizando la homogeneidad en el llenado de los moldes. Con el fin de tener una repetibilidad de los resultados, se fabricaron 3 probetas cubicas por cada mezcla, lo que resulto en un total de 12 cubos fabricados. Estas probetas, con dimensiones de 5x5x5cm (125cm³), fueron desmoldadas tras 24 horas y sometidos a un proceso de curado de 7 días; a los 28 días de su elaboración fueron sometidas al ensayo mecánico y térmico.

Tabla 3. Dosificación de mezcla.

Sustitución Bioagregado (%)	Relación a/c	Ceniza Volante (%)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Bioagregado (kg)	Agua (L)	Ceniza Volante (kg)	Volumen Total Calculado (m ³)	Agua pret (L)
0	0.45	20	0.08	0.750	0.000	0.045	0.017	0.000375	(kg)
0	0.45	40	0.08	0.721	0.000	0.050	0.032	0.000375	0.000
0	0.65	20	0.08	0.711	0.000	0.062	0.016	0.000375	0.000
0	0.65	40	0.08	0.679	0.000	0.069	0.030	0.000375	0.000
20	0.45	20	0.08	0.600	0.084	0.045	0.017	0.000375	0.067
20	0.45	40	0.08	0.576	0.081	0.050	0.032	0.000375	0.065
20	0.65	20	0.08	0.569	0.080	0.062	0.016	0.000375	0.064
20	0.65	40	0.08	0.543	0.076	0.069	0.030	0.000375	0.061
50	0.45	20	0.08	0.375	0.211	0.045	0.017	0.000375	0.169
50	0.45	40	0.08	0.360	0.202	0.050	0.032	0.000375	0.162
50	0.65	20	0.08	0.355	0.199	0.062	0.016	0.000375	0.159
50	0.65	40	0.08	0.340	0.191	0.069	0.030	0.000375	0.153

El ensayo a compresión se determinará mediante una maquina universal de ensayos. Las probetas cubicas se someterán a una carga de compresión uniaxial progresiva hasta alcanzar la falla, registrando la fuerza máxima de ruptura en Newtons (N). Se registrará la fuerza máxima en Newtons para, posteriormente, calcular la resistencia en Megapascuales (MPa) dividiéndola carga entre el área transversal de la probeta.

La evaluación térmica se llevará a cabo con un equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS, se insertará una sonda de aguja en el centro de las muestras para generar un pulso de calor transitorio. Mediante este procedimiento, se obtendrán de manera directa los valores de conductividad térmica (k) y resistividad (r), permitiendo analizar la eficiencia aislante de la mezcla.

3.6 Metodología para la elaboración de bloques orgánicos.

3.6.1 Bloques orgánicos (15x20x40cm).

La fabricación de los bloques de concreto vegetal se llevará a cabo utilizando la formulación de mezcla óptima identificada en el diseño experimental. Todo el proceso se realizará en un ambiente controlado reduciendo variantes (ambientales, humedad, polvos) y calidad de las probetas. La mezcla se preparará en una mezcladora de concreto eléctrica de eje vertical, siguiendo una secuencia de adición rigurosa para asegurar la homogeneidad. Primero, se introducirán los agregados (el bioagregado de lechuguilla y la arena) y se mezclará en seco brevemente. A continuación, se añadirá el agua de absorción necesaria para evitar que este absorba el agua de reacción del cemento. Una vez que los agregados estén saturados, se incorporarán los materiales cementantes (cemento Portland y ceniza volante), y finalmente, se agregará el agua de reacción para alcanzar la relación agua/cemento objetivo.

Una vez que la mezcla alcance una consistencia uniforme, su fabricación se realizará sobre una mesa vibradora. La mezcla se verterá en los moldes de bloque y se someterá a vibración y compactación simultáneamente. Este proceso es crucial para eliminar el aire atrapado y asegurar una distribución homogénea de los componentes, obteniendo así un bloque denso en su estado fresco. Después del desmolde, los bloques serán sometidos a un proceso de curado controlado durante 7 días en una cámara húmeda o bajo condiciones de humedad constante, para permitir el desarrollo adecuado de las reacciones de hidratación del cemento antes de ser sometidos a las pruebas mecánicas y térmicas.

3.6.2 Estudio de propiedades térmicas (Hot box).

La capacidad de aislamiento térmico de los bloques se determinará mediante un ensayo en Caja Caliente (HotBox). El bloque se colocará como elemento divisor dentro de una cámara hermética, donde se generará un flujo de calor constante mediante un diferencial de temperatura controlado. Para este ensayo se aplicará una temperatura constante de 55°C en la zona de la resistencia y se mantendrá el generador de la parte fría a 15°C , estableciendo un gradiente térmico de 40°C a través de la pieza.



Figura 7. Imagen de la Hot Box elaborada en el laboratorio del CIMAC.

La instrumentación se basará en el uso de 11 sondas de termopar distribuidas para registrar el comportamiento térmico del bloque y su ambiente. Para el monitoreo del bloque, se perforarán ocho orificios a su mismo nivel y profundidad, garantizando la homogeneidad en la toma de datos. En la cara expuesta al flujo de calor se instarán tres termopares, uno adicional en la parte interna de dicha cara. De manera simétrica en la cara orientada en la parte fría, se colocarán tres termopares en la superficie expuesta y el interior en el hueco central.

Complementariamente, se dispondrán tres sensores para el control ambiental de la Hot box. Uno localizado en la zona fría, uno en el generador de calor y un tercero en la zona intermedia entre el bloque y la fuente térmica. Para asegurar la integridad

de las mediciones y un flujo de calor unidireccional, el bloque se aislará perimetralmente con fibra de vidrio. El ensayo se mantendrá activo hasta lograr la estabilización de las sondas, periodo que se estima en 48h.

Así mismo, se realizaron cálculos para calcular la energía que pasa por los bloques con las siguientes ecuaciones:

$$Q = K A \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

3.6.3 Ensayo de resistencia a la compresión.

Para determinar la capacidad de carga del material, los bloques serán sometidos a un ensayo de compresión. Previo a la prueba, se realizará un encabezado con una capa de azufre fundido en las superficies superior e inferior del bloque. Este procedimiento garantiza que las caras de carga sean perfectamente planas y paralelas, lo que permite una distribución uniforme de los esfuerzos aplicados. Una vez preparado, el bloque se colocará en una máquina universal de ensayos y se someterá a una carga de compresión axial a una velocidad controlada hasta que se produzca la falla. La carga máxima resistida se registrará y se utilizará para calcular su resistencia a la compresión, la cual será expresada en Megapascuales (MPa).

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Resultados y Discusión.

4.1 Caracterización química y biológica del bioagregado.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización química y biológica del Agave de lechuguilla en su estado natural sin tratamiento, analizados en el Laboratorio de Química analítica de la Facultad de Ciencias Biología dentro de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En la tabla 4 se integran los datos obtenidos de composición química y biológica bajo la normativa TAPPI, estableciendo datos cuantitativos para la discusión de sus propiedades.

Tabla 4. Resultados de la caracterización por la normativa TAPPI.

Parametro Quimico (%)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	Obtenido prom. (%)	Referencia (Carmona, 2017)
Alfa Celulosa	60.88	61.55	59.97	60.80	17.72 ± 0.68
Hemicelulosa	15.53	16.20	16.60	16.11	17.15 ± 0.91
Holocelulosa	76.41	77.76	76.58	76.91	3.64 ± 0.34
Lignina Insoluble	15.05	10.03	11.37	12.15	7.64 ± 0.21
Extraíbles	3.64	4.49	4.04	4.06	45.34 ± 1.2
Cenizas	2.96	4.04	4.09	3.70	12.45 ± 0.88
Humedad	26.21	21.23	23.54	23.66	6.56

La caracterización revela que la lechuguilla analizada en este estudio posee un alto potencial estructural, con un contenido promedio de Alfa celulosa de 60.8%. Este valor es significativamente superior al reportado por Carmona et. (2017) (17.72%), lo que se puede intuir que el material utilizado en esta investigación exploratoria presenta una posible fracción cristalina más estable ideal para su uso como refuerzo en matrices cementantes.

Por otro lado, se observa una discrepancia en el contenido de extraíbles (4.06% obtenido contra 45.34% referenciado). Esta reducción es favorable para la investigación, ya que los extraíbles (ceras, resinas y azúcares) pueden actuar como inhibidores de la hidratación del cemento. El bajo porcentaje de cenizas (3.7%) nos indica la alta pureza orgánica del bioagregado seleccionado.

En cuanto la lignina insoluble, el promedio obtenido de 12.15% se compara con los rangos típicos de fibras lignocelulósicas (15% - 35%) que el valor atípico mencionado en secciones previas del análisis. Esta proporción de lignina es fundamental, ya que actúa como un adhesivo natural que proporciona rigidez y protección biológica a la fibra dentro de la matriz cementante.

Finalmente, el contenido de humedad promedio del 23.66% es un factor importante para el diseño de mezcla, indicando la absorción de agua del bioagregado para no afectar la relación agua/cemento final.

4.2 Caracterización del bioagregado de lechuguilla durante los diferentes ciclos de hornificación.

4.2.1 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

Se procedió a realizar un estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) al bioagregado de lechuguilla en sus diferentes ciclos de lavado.

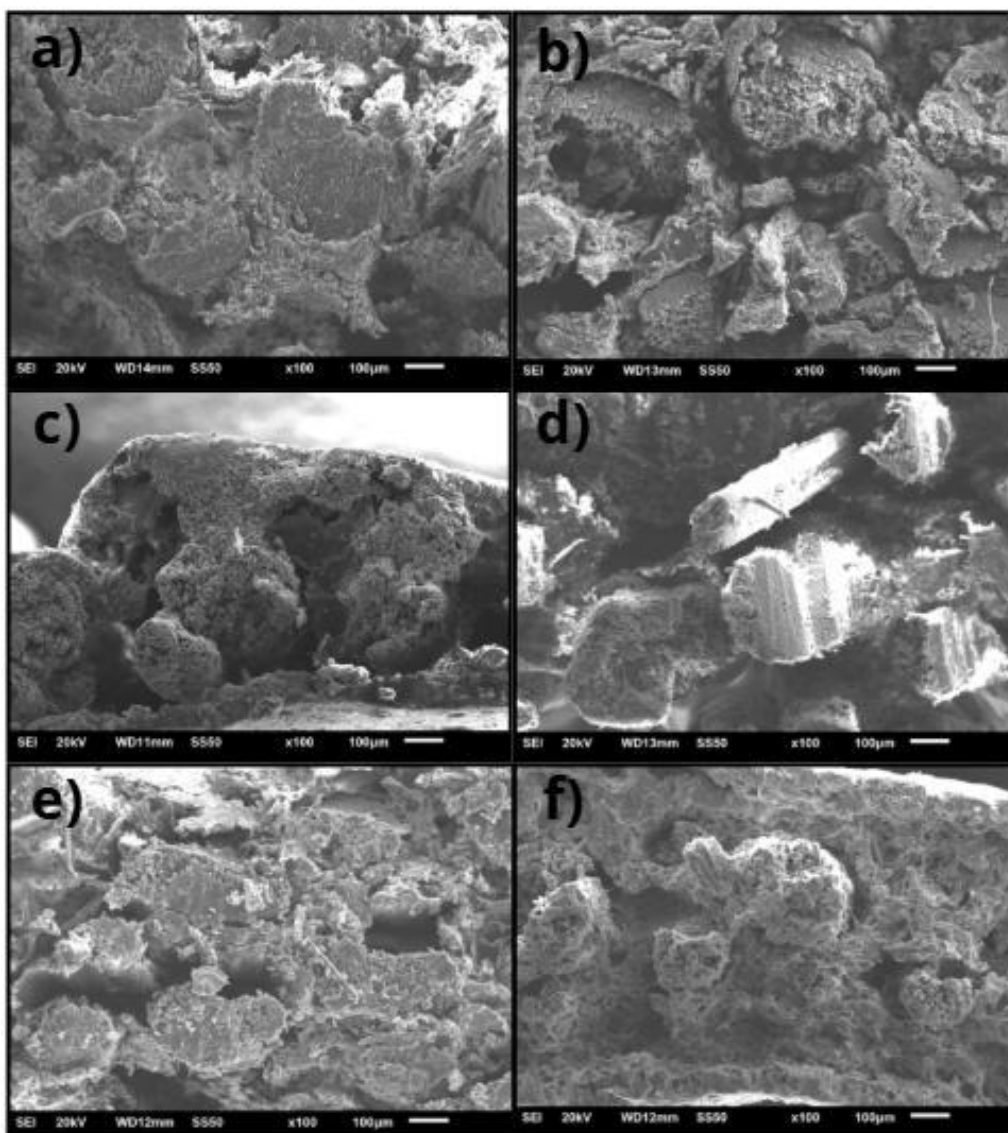


Figura 8. a) Bioagregado sin lavado previo. b) Después del primer lavado. c) Después del segundo lavado. d) Bioagregado después del tercer lavado. e) Bioagregado después del cuarto lavado. f) Bioagregado después del quinto lavado.

En el análisis SEM se logra observar un cambio a lo largo de los ciclos de lavado por el método de hornificación. La Figura 8 (a) muestra una superficie relativamente densa y con material mineral (oxalato de calcio y resina) cubriendo la estructura fibrosa. Con cada ciclo de lavado se aprecia una reducción constante de estos componentes superficiales, lo que se propicia una mayor exposición de las fibras, aumentando los espacios de aire para lograr una menor densidad del bioagregado.

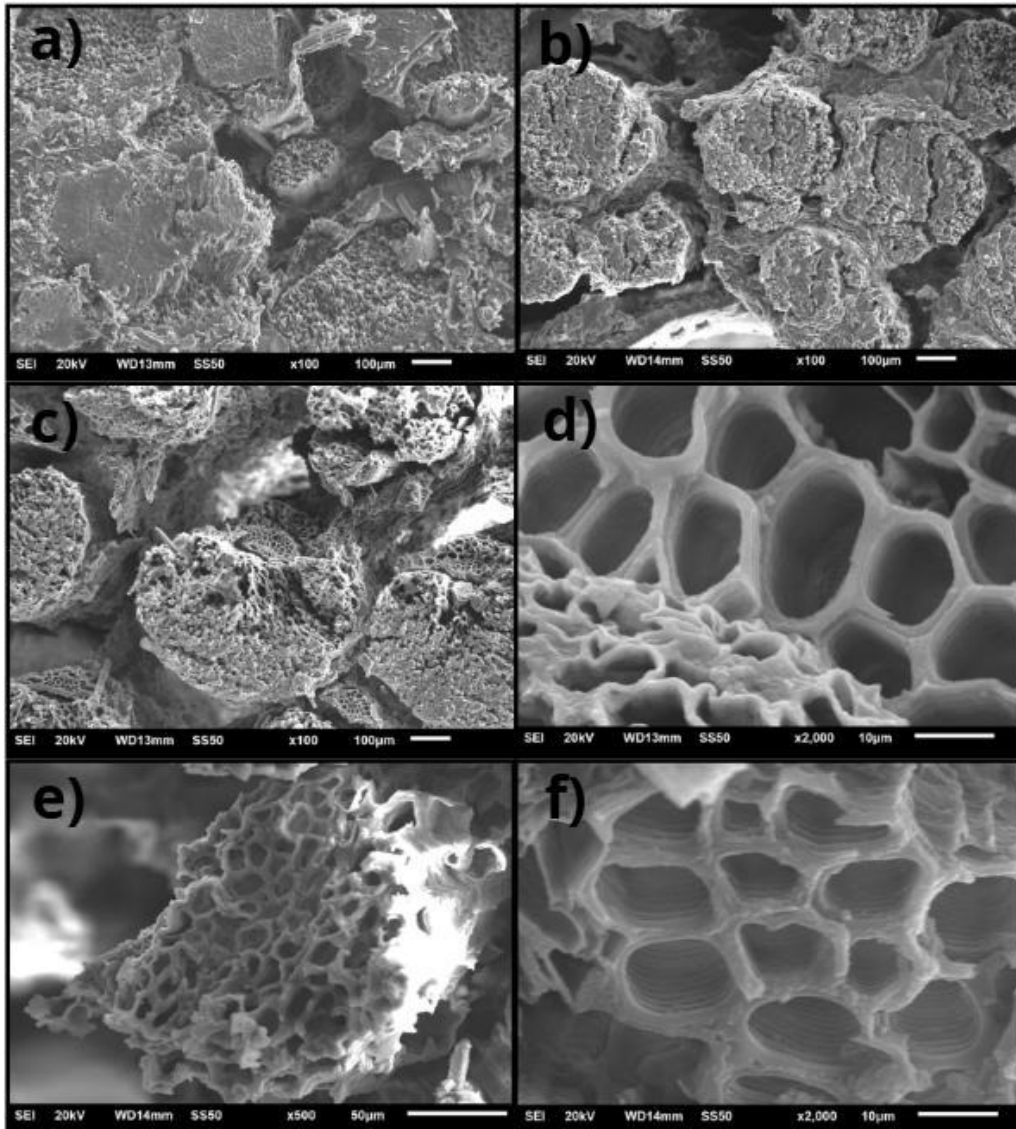


Figura 9. a) Bioagregado después del sexto lavado. b) Después del séptimo lavado. c) Después del octavo lavado. d) Octavo lavado con un aumento de x2000. e) Después del noveno lavado. f) Noveno lavado con un aumento de x2000.

En la figura 9, muestra un incremento progresivo en la porosidad del bioagregado de lechuguilla, ocasionados por los lavados 8 y 9. En el aumento x2000 se aprecia una estructura fibrosa interconectada por los poros tras la extracción de los compuestos hidrosolubles. Esta morfología porosa disminuye la densidad del bioagregado, y se obtiene una mayor área de superficie, lo que podría beneficiar a la adherencia y compatibilidad con la matriz cementante para la elaboración de bloques. La porosidad inducida por el tratamiento de hornificación convierte a la lechuguilla en un bioagregado con alta capacidad de integración, lo cual puede beneficiar que el bloque de mampostería funcione como una unidad estructural solida reduciendo la conductividad térmica.

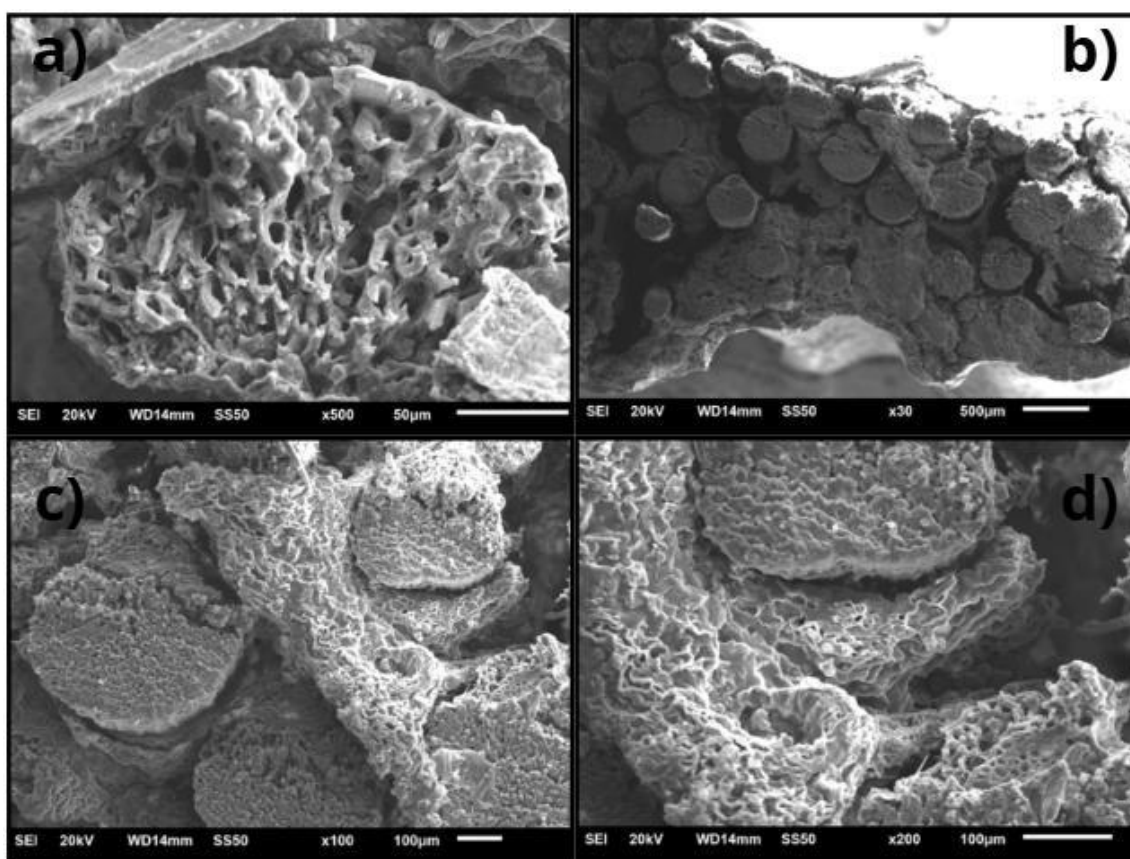


Figura 10. a) Décimo lavado. b) Onceavo lavado con un aumento de x30. c) Onceavo lavado con aumento de x100. d) Octavo lavado con un aumento de x200.

En la figura 10 se observa las micrografías del lavado decimo (a) y onceavo (b), se logra apreciar la liberación de los poros, donde en inciso (b) se tomó un menor aumento, para apreciar como las fibras quedan expuestas. Así mismo, en las últimas

imágenes (c, d) se siguen observando los poros internos con mayor aumento. Se puede observar que la estructura interna es favorable en la extracción de solubles por el método de hornificación.

Como análisis complementario que se realizó en el mismo equipo SEM, se llevó a cabo la Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) para identificar la composición elemental del bioagregado en sus diferentes etapas de lavado. Este análisis permitió monitorear la evolución química de la fibra, detectando los elementos presentes mas no los compuestos específicos. El espectro resultante revelo los porcentajes relativos de elementos principales como carbono y oxígeno (propios de las estructuras biológicas con alfa celulosa y lignina), así como calcio, cloro y otros elementos residuales.

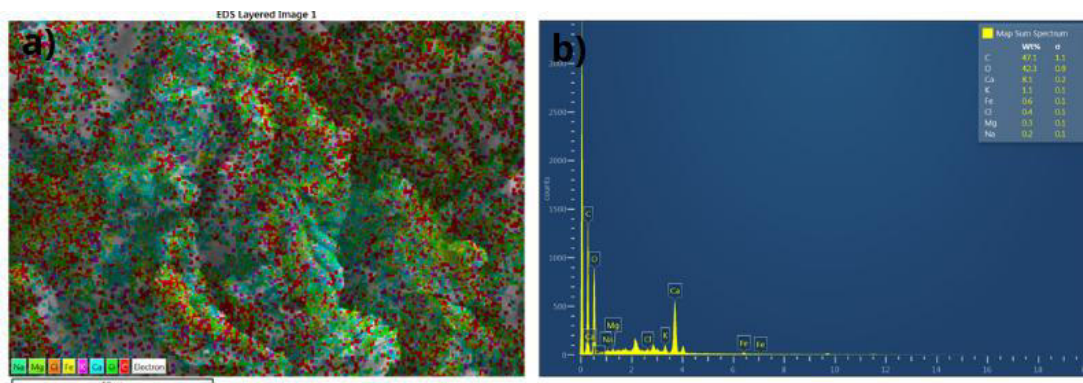


Figura 11. a) Mapeo de distribución elemental sobre el bioagregado sin lavados previos. b) Espectro EDS sin lavados.

En la figura anterior se puede observar el estudio EDS del bioagregado sin iniciar los ciclos de lavado. Donde muestra una alta proporción de carbono (47.1%) y oxígeno (42.3%) indicando que es un material orgánico. Una presencia de sodio (0.2%) y cloro (0.4%) con una baja cantidad, una alta concentración de estos elementos puede afectar al fraguado y la compatibilidad con la matriz cementate. Otros elementos encontrados fueron el potasio, hierro, magnesio y carbono menores al 10% de porcentaje en peso (Wt%).

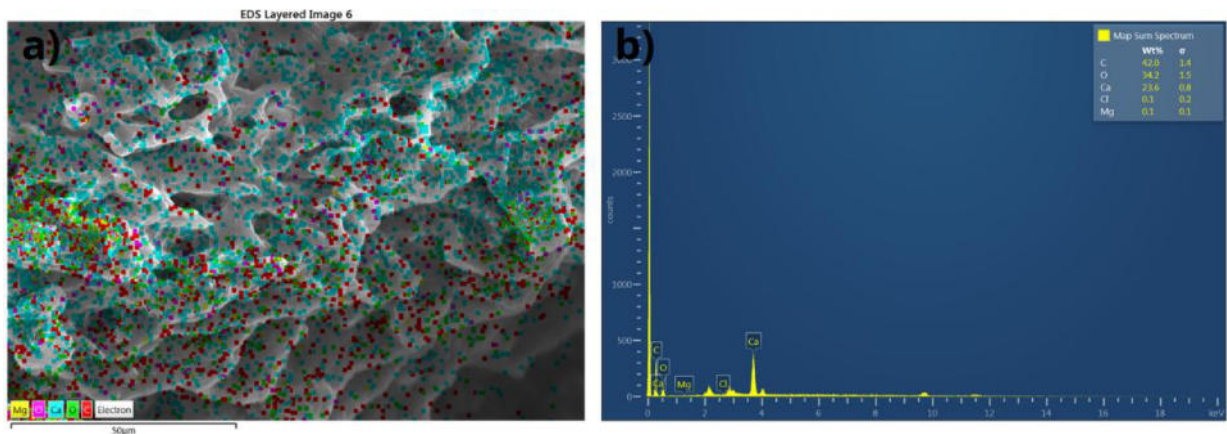


Figura 12. a) Mapeo de distribución elemental sobre el bioagregado después del onceavo lavado. b) Espectro EDS en el onceavo lavado.

En la figura 11 muestra el EDS del lavado onceavo donde se observa una disminución del cloro (0.1%) y sin presencia del sodio, observando una efectiva remoción de sales mínimamente presentes en el material. Con un carbono y oxígeno con mayor predominación, aunque con menor proporción de oxígeno. En cambio, el calcio aumento significativamente a un 23.6%. dentro de esta estructura se puede observar una menor presencia de elementos potencialmente inhibidores del fraguado, indicando una mayor probabilidad de compatibilidad con el cemento en comparación con el bioagregado sin tratamiento.

4.2.2 Estructura cristalina y fases por Difracción de Rayos X (DRX).

Para obtener una mejor caracterización del bioagregado de lechuguilla, se realizó un análisis de difracción de rayos x (DRX) en las muestras correspondientes a los lavados w1 – w15(w= wash / lavado). Este estudio identificara la presencia de fases cristalinas y evaluara los posibles cambios en la estructura del agregado a medida que avanza el proceso en los lavados.

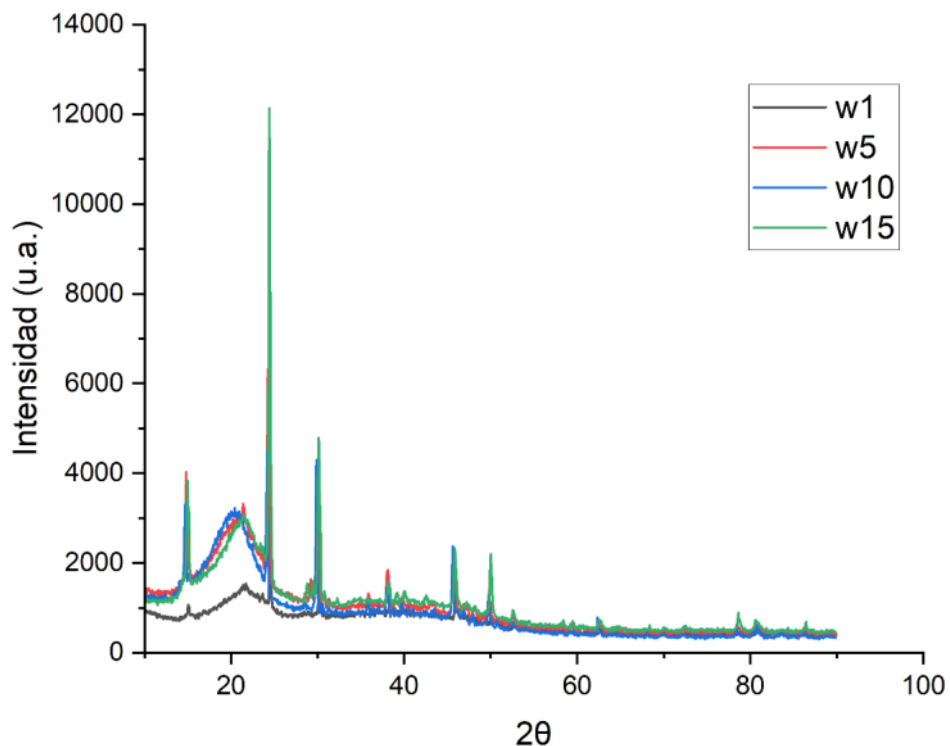


Figura 13. Grafica DRX del bioagregado.

En la figura 13 se observan los análisis, se pudo comparar el DRX de w1 y w15, donde se observa una menor intensidad general en el w15, indicando una pérdida de cristalinidad o masa cristalina. El pico prominente a 20-23° en w15 aumenta en comparación al w5, deduciendo una posible disolución de compuestos. De la misma manera en el pico 27-28°. Esto puede interpretarse que los lavados por el método de hornificación provoca una modesta remoción o alteración de la fase cristalina presentes en el bioagregado.

4.2.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Los resultados obtenidos con la técnica de FRX permitieron cuantificar la composición elemental de las muestras en términos de óxidos, proporcionando una

base de datos. En la tabla 5 se muestran las concentraciones obtenidas para las 10 muestras analizadas.

Tabla 5. Resultados FRX

Muestra	CaO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
W-1	86.91	3.39	2.60	3.56	0.55	0.51	1.73	-
W-2	92.30	1.88	2.52	2.09	-	0.41	-	-
W-3	90.22	3.34	2.63	1.60	0.92	0.46	-	0.07
W-4	92.41	1.84	2.94	1.11	0.56	0.28	-	-
W-5	90.51	3.46	2.77	0.98	1.11	0.38	-	0.11
W-6	87.63	4.37	2.04	1.35	1.42	0.43	-	0.20
W-7	92.43	2.50	1.87	0.50	0.87	0.30	-	0.07
W-8	91.29	2.39	2.98	0.46	0.72	0.38	-	0.11
W-9	93.79	2.12	1.93	0.36	0.63	0.32	-	0.07
W-10	92.71	2.14	1.94	0.32	-	0.18	1.07	0.01

En la tabla 5 se puede observar una mayor cantidad de óxido de calcio (CaO), con valores que oscilan entre el 86.91 y el 93.79. Esta alta pureza cálcica es importante, ya que el CaO es un compuesto principal para la formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) tras la reacción con la sílice (SiO₂) presente. La estabilidad de esta fase cálcica nos asegura un ambiente alcalino en la matriz, lo cual es favorable para el fraguado de la matriz, pero el exceso nos puede causar una carbonatación prematura, incrementando la porosidad del bloque.

Por otro lado, la muestra w10 presenta una concentración de trióxido de azufre (SO₃) del 1.07%; niveles elevados de sulfatos pueden provocar en la matriz una expansión volumétrica tardía por la formación de etringita secundaria, provocando micro fisuras internas y reducción la capacidad de carga del elemento.

4.2.4 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

Se presenta un estudio comparativo de los espectros obtenidos por el equipo FTIR sobre el bioagregado en las diferentes etapas de lavado. El análisis FTIR iniciará

desde la muestra correspondiente al primer lavado (w1) hasta el onceavo lavado (w15), buscando identificar los cambios en los grupos funcionales del material en el avance de los lavados.

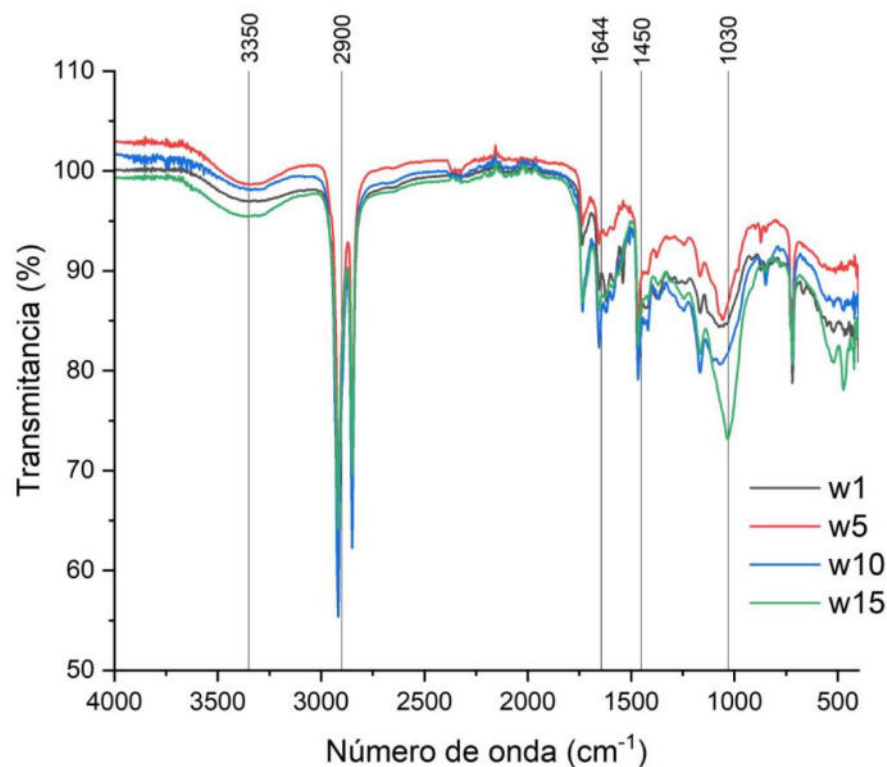


Figura 14. Grafica FTIR del bioagregado.

El espectro FTIR revela las bandas características de celulosa y hemicelulosa O-H (3350 cm^{-1}), C=O (1730 cm^{-1}), C-O-C (1144 y 1030 cm^{-1}). La intensidad entre las bandas varía conforme pasan los lavados, indicando cambios en la concentración de estos grupos a medida que se extraen los hidrosolubles.

Al comparar los espectros del lavado w1 y w10, se observan diferencias en las intensidades de algunas bandas. En el w2, la banda alrededor de 2920 cm^{-1} (C-H de alcanos) y la banda ancha centrada en 3300 cm^{-1} (O-H de celulosa o agua) son más pronunciadas, sugiriendo una mayor presencia de estos grupos. En el caso del w11, estas bandas disminuyen, indicando una posible pérdida de componentes

hidrosolubles. La banda 1730 cm^{-1} (C=O de esteres o ácidos carboxílicos) también muestran cambios, observando la alteración de compuestos orgánicos a lo largo de los lavados.

4.2.5 Análisis Termogravimétrico (TGA).

El análisis termogravimétrico (TGA) se empleó para evaluar la estabilidad térmica de las fibras de Agave de lechuguilla. Los termogramas obtenidos presentados en la Figura 15, muestran un comportamiento térmico multifásico característico de las biomazas lignocelulósicas, con un rango de degradación principal entre 200°C y 550°C .

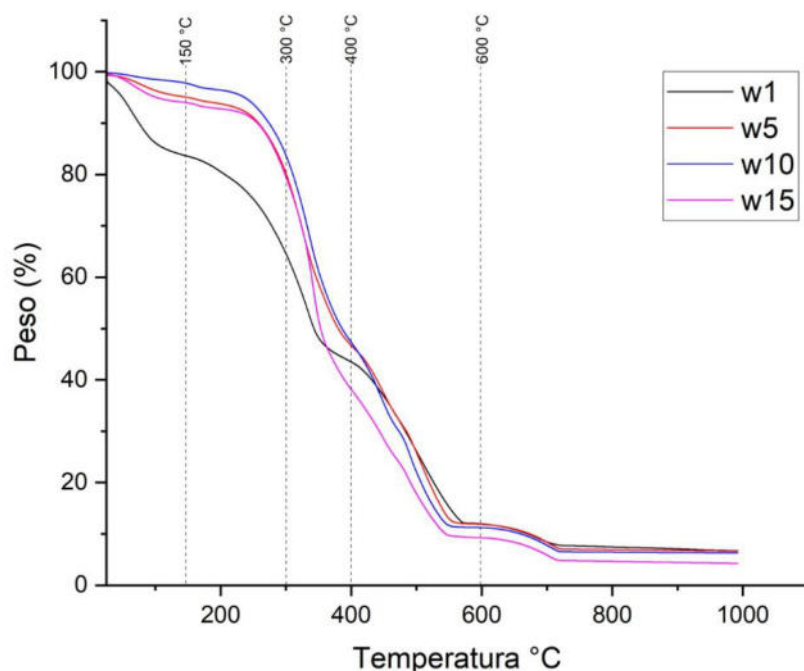


Figura 15. Grafica TGA del bioagregado y sus diferentes fases.

Como se puede observar en el rango inicial de 0°C a 150°C se presenta la fase asociada a la eliminación de la humedad, así como la volatilización de compuestos

de bajo peso molecular. En la figura 15 se observa una reducción significativa en la pérdida de masa de las fibras lavadas, siendo la w10 la que presentó una mayor estabilidad volumétrica en este intervalo. Esto sugiere que el protocolo de lavado w10 modificó la hidrofobicidad superficial de la fibra, reduciendo su afinidad por el agua, esto puede mitigar expansiones volumétricas dentro de la matriz cementante.

Entre la temperatura 150°C y 300°C presenta una descomposición térmica de la hemicelulosa. Las fibras lavadas w5, w10, w15 presentan una pendiente más suave y uniforme a comparación del w1. Esto nos puede decir que el tratamiento de hornificación ayuda a remover estas impurezas superficiales que, de permanecer en la mezcla puede perjudicar a la adhesión mecánica entre la fibra y el cemento.

La fase cristalina se presenta entre los 300°C a 400°C este intervalo corresponde a la degradación térmica de la celulosa cristalina, el polímero estructural que confiere resistencia a la tracción a la fibra de lechuguilla. La pendiente de mayor caída en las muestras lavadas comparada con la muestra w1 sugiere una mayor concentración relativa de celulosa cristalina remanente. Esta conservación de la fase cristalina garantiza que el bioagregado aporta una mejor estructura a la mezcla, el exceso de lavados afecta a una degradación del bioagregado.

Por último, está la última fase donde se descompone la lignina y compuestos inorgánicos. A partir de los 400°C se atribuye principalmente a la lenta carbonización de la lignina; a los 700°C, la pérdida de masa se estabiliza, dejando un residuo correspondiente a la fracción inorgánica (cenizas). Los resultados de las muestras que el w15 presentó un residuo final menor, indicando una eliminación más efectiva de impurezas minerales solubles en agua.

4.3 Recomendación del RILEM TC 236-BBM

4.3.1 Determinación del contenido de agua inicial.

Se realizó un secado inicial del bioagregado de lechuguilla a 60°C por 24 horas con el objetivo de homogenizar su contenido de humedad y establecer una condición de

partida consistente para el tratamiento térmico. Los resultados de este análisis de humedad inicial se presentan en la Tabla 10:

Tabla 6. Contenido de humedad inicial del bioagregado.

Contenido de humedad inicial			
	Po	Pf	%h
1	100	95.6	4.6
2	100	95.7	4.5
3	100	92.2	8.2
Prom			5.75

Como se observa en la Tabla 10, el bioagregado de lechuguilla, después del secado inicial a 60°C durante 24 horas, presenta un contenido de humedad promedio del 5.75%. Este valor es significativamente menor que el contenido de humedad de la lechuguilla en su estado natural (23.66%, según la Tabla 3). La ligera variabilidad entre las muestras (desde 4.5% hasta 8.2%) es esperable en materiales lignocelulósicos y refleja la posible heterogeneidad en la absorción y retención de humedad residual. Establecer este contenido de humedad inicial es necesario para elaborar los diseños de mezcla.

4.3.2 Determinación de la absorción de agua por inmersión.

Los resultados de la Tabla 11 demuestran la alta capacidad de absorción de agua del bioagregado de lechuguilla hornificado. Se observa una rápida absorción inicial, alcanzando un 75.32% de absorción en el primer minuto, lo que indica que una porción significativa del agua penetra rápidamente en la estructura porosa de la fibra. Esta absorción continúa aumentando progresivamente con el tiempo, llegando a 112.08% a las 4 horas, 122.16% a las 24 horas y finalmente un 135.40% a las 72 horas.

Tabla 2 Porcentaje de absorción de agua del bioagregado de lechuguilla.

Absorción de agua			
Tiempo		Prom	% Abs
	1min	55.49	75.32
	15min	58.62	87.84
	4h	64.68	112.08

	24h	67.2	122.16
	72h	70.51	135.4

La elevada capacidad de absorción de agua de la lechuguilla, incluso después de la hornificación, es una característica inherente a los materiales lignocelulósicos debido a su estructura porosa y la presencia de grupos hidroxilo en la celulosa y hemicelulosas (aunque estos últimos hayan sido parcialmente reducidos por la hornificación). Si bien la hornificación busca reducir la hidrofiliidad y la absorción de agua, este porcentaje sigue siendo considerablemente alto en comparación con agregados convencionales. Esta propiedad ayudara en el diseño de mezclas de concreto, para contemplar el agua de pretratamiento.

4.3.3 Determinación de la densidad aparente seca.

La densidad aparente seca y la densidad real son propiedades físicas fundamentales para la dosificación y el diseño de mezclas que incorporan bioagregados, así como para entender la porosidad interna del material.

La densidad aparente seca del bioagregado de lechuguilla hornificada fue determinada siguiendo la metodología pertinente, obteniéndose un valor promedio de 0.23 g/cm^3 . Este valor relativamente bajo es característico de los bioagregados lignocelulósicos, los cuales poseen una estructura celular con alta porosidad interna. Esta baja densidad contribuye a la reducción de la masa para aplicaciones de la construcción, mejorando el aislamiento térmico y acústico de los materiales resultantes.

Por otro lado, la densidad real del bioagregado de lechuguilla hornificado se midió utilizando un picnómetro. El valor promedio de la densidad real obtenido fue de 1.46 g/cm^3 . La densidad real representa la densidad de la materia sólida del material, excluyendo los poros internos. La diferencia significativa entre la densidad aparente

seca y la densidad real (0.23 g/cm^3 vs. 1.46 g/cm^3) confirma la naturaleza porosa del bioagregado de lechuguilla.

4.3.4 Determinación de la distribución del tamaño de partícula por tamizado.

La distribución de tamaños de partícula del bioagregado de lechuguilla se determinó mediante tamizado mecánico, y los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 3 Distribución Granulométrica del Bioagregado de Lechuguilla.

Distribución de tamaño de partículas					
No. Mallas	1	2	3	Prom	% Retenido
1/2"	0.14	0.2	0.1	0.15	0.1
3/8"	2.69	3.1	2.8	2.86	1.1
1/4"	139.9	179.5	147.5	155.63	62.3
No.4	52.9	28	49.3	43.40	17.4
No.5	25.8	20.3	26.2	24.10	9.6
Pasa No.5	28.2	18.5	24.2	23.63	9.5
total	249.63	249.6	250.1		99.9

La Tabla 12 muestran que el bioagregado de lechuguilla utilizado es predominantemente grueso, con la mayor fracción de partículas retenida en la malla de 1/4" (6.3 mm), representando un 62.3% del total. Le sigue el material retenido en la malla No. 4 (4.75 mm) con un 17.4%, y en la malla No. 5 (4.0 mm) con un 9.6%. Una pequeña fracción (1.1%) se retiene en la malla de 3/8" (9.5 mm) y una cantidad mínima (0.1%) en la malla de 1/2" (12.5 mm). Aproximadamente el 9.5% del material es más fino que la malla No. 5 (4.0 mm).

Esta distribución indica que la lechuguilla procesada para su uso como bioagregado tiene un tamaño de partícula que la clasifica dentro del rango de agregados gruesos a intermedios. La predominancia de partículas de un tamaño específico (alrededor de

6.3 mm) es beneficiosa para asegurar una distribución uniforme en la mezcla de concreto, aunque la presencia de un porcentaje de finos (Pasa No. 5) es importante para la trabajabilidad y para rellenar los huecos.

4.4 Elaboración de especímenes.

4.4.1 Diseño de experimentos 2^k fraccionado.

Para establecer los factores que influyen mas en la mezcla utilizando la lechuguilla, se seleccionaron tal y tal factores, mostrados en la sig tabla.

Como respuesta se obtuvo resistencia, conductividad,

Para calcular el número de especímenes a evaluar se utilizo el software Desing expert, con 12 experimentos, con el fin de reducir costos y tiempos de tesis. Ver tabla x.

Referencia de vaores de conductividad, y resistividad, reportado por x o x persona y diferentes materiales. (cáñamo, cascara de arroz, cacahuate etc)

4.5 Elaboración de bloque orgánico.

4.5.1 Estudio de propiedades térmicas (Hot box).

4.5.2 Ensayo de resistencia a la compresión.

5. Conclusiones

1. Su bajo contenido de cenizas (promedio 3.70%) es indicativo de una alta pureza orgánica, característica deseable en materiales lignocelulósicos.
2. La presencia de extraíbles (promedio 4.06%) sugiere la existencia de ceras y resinas superficiales que podrían dificultar la adhesión con matrices cementantes, resaltando la importancia del proceso de hornificación para su remoción.
3. Los resultados de holocelulosa (promedio 76.91%), con un alto porcentaje de α -celulosa (60.80%) y hemicelulosas (16.11%), confirman la naturaleza fibrosa y el potencial estructural de la lechuguilla. No obstante, la elevada y atípica proporción de lignina insoluble en ácido reportada (87.85%) plantea una inconsistencia en la suma de componentes y requiere una revisión metodológica o una discusión más profunda sobre la composición única de esta especie.
4. Muestra una alta capacidad de absorción de agua, alcanzando un 75.32% en el primer minuto y hasta un 135.40% a las 72 horas. Esta propiedad es crítica para su aplicación en concreto, ya que requiere un manejo cuidadoso de la dosificación de agua en la mezcla para evitar problemas de trabajabilidad y garantizar una hidratación adecuada del cemento.
5. Las propiedades de densidad confirman su naturaleza ligera y porosa: una densidad aparente seca muy baja (0.23 g/cm^3) lo clasifica como un agregado ligero, beneficioso para la reducción del peso estructural. La densidad real (1.46 g/cm^3), significativamente mayor que la aparente, reitera la alta porosidad interna de las fibras.
6. La distribución granulométrica indica que el bioagregado es predominantemente grueso, con la mayor fracción (62.3%) en el rango de $1/4''$ (6.3 mm), lo que es adecuado para su uso como agregado grueso en materiales compuestos y permite prever su comportamiento en la mezcla.

7. El proceso de hornificación es crucial para modificar la superficie de la fibra, eliminando componentes hidrofílicos y extractivos que pueden afectar la interfaz con el cemento. Los análisis FTIR preliminares (pendientes de una comparación completa) serán clave para confirmar estos cambios químicos.

6. Referencia

Nobel, P.S. y W. L. Berry. 1985. Element responses of Agaves. *Amer. J. Bot.* 72(5): 686-694.

1. Amantino, G. M., Hasparyk, N. P., Tiecher, F., & Filho, R. D. T. (2022). Assessment of bio-aggregate concretes' properties with rice residue. *Journal Of Building Engineering*, 52, 104348. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104348>
2. Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., & Sonebi, M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(3), 2–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.
3. Arellano Vázquez Diego Armando (2020), “Metodología para el Desarrollo de materiales constructivos de bajo impacto ambiental en México”. Grado de doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Arquitectura.
4. Bio-based products. (s. f.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship And SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/biotechnology/bio-based-products_en.
5. Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., & Woodward, P. (2018). *Química: La ciencia central* (14ª ed.). Pearson.
6. Brümmer, M. (2014). El cáñamo en la construcción: antecedentes, materiales y técnicas. *Construcción Sostenible*, 24-24.
7. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach* (6th ed.). Wiley.

8. Cathy. (2022, 30 septiembre). Mechanical Testing: Different Types of Testing for Mechanical Properties. Rapiddirect. <https://www.rapiddirect.com/es/blog/what-is-mechanical-testing/#:~:text=La%20prueba%20de%20tracci%C3%B3n%20es,tirar%20hasta%20que%20se%20rompa.>
9. Carmona, J. E., Morales-Martínez, T. K., Mussatto, S. I., Castillo-Quiroz, D., & Ríos-González, L. J. (2017). Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (Agave lechuguilla Torr.). *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(42), 113-134.
9. Conceptos básicos del aislamiento térmico - VIPEQ. (2019, 28 marzo). VIPEQ. <https://www.vipeq.es/aislamiento-termico/conceptos-basicos-del-aislamiento-termico/>
10. Da Gloria, M. y R., Andreola, V. M., Santos, D. o. J. D., Pepe, M., & Filho, R. D. T. (2021). A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. *Journal Of Building Engineering*, 34, 101696. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101696>
11. Dávila-Pompermayer, L.G. Lopez-Yepe, P. Valdez-Tamez, C.A. Juárez, A. Durán-Herrera, (2020). Lechuguilla natural fiber as internal curing agent in self-compacting concrete (SCC): Mechanical properties, shrinkage and durability, *Cement and Concrete Composites*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103686>.
12. Fluorescencia de rayos X (FRX) | Universidad de Burgos. (s. f.). <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/fluorescencia-de-rayos-x-frx#:~:text=La%20fluorescencia%20de%20rayos%20X,de%20capas%20interiores%20del%20%C3%A1tomo.>
13. **García Arias, A., & Muñoz-Sanguino, C. (2020). El uso del cáñamo en la edificación: una revisión del estado del arte. *Informes de la Construcción*, 72(559), e351. <https://doi.org/10.3989/ic.73356>**
13. Germán Ramírez, M. T. (1980). Herbario Nacional de Mexico: EXU: Instituto de Biología, U.N.A.M. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
14. Gonzales Elizabeth, 2023. Contaminación en Nuevo León: Versiones Encontradas. Verificado. <https://verificado.com.mx/contaminacion-nuevo-leon-versionesencontradas/#:~:text=Pese%20a%20que%20las%20pedreras,tipo%20de%20part%C3%ADculas%20proviene%20de>
15. INEGI, 2020. "Comunicado, Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020". (2021, August 23). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/envi/ENVI2020.pdf>

16. Isohemp. (2023, 2 agosto). Bloques de cáñamo para trabajos de albañilería natural y eficiente. IsoHemp - Construire Et Isoler Durablement En Blocs de Chanvre. <https://www.iso hemp.com/es/bloques-de-canamo-para-trabajos-de-albanileria-natural-y-eficiente>.
17. Ixtle de Lechuguilla — Tierra de saberes. (s. f.). Tierra de Saberes. <https://www.tierradesaberes.mx/ixtle-de-lechuguilla>.
18. Joyram, H., Govindan, K., & Nunkoo, R. (2022). A comprehensive review on the adoption of insulated block/eco-block as a green building technology from a resident perspective. Cleaner Engineering And Technology, 8, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100480>
19. Kannan, K. S. (2023). Preparation of Eco-bricks with a topical coating of silver nanoparticles. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.285>
20. Lopes, J. R. N., De Araújo Kalid, R., Rodríguez, J. L. M., & Filho, S. Á. (2019). A new model for assessing industrial worker behavior regarding energy saving considering the theory of planned behavior, norm activation model and human reliability. Resources, Conservation And Recycling, 145, 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.042>
21. M'.Yassin.Rajiv. da Gloria, V.M. Andreola, D.O.J. dos Santos, M. Pepe, R.D. Toledo Filho, (2020). A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites, Journal of Building Engineering, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101696>.
22. Malvern Panalytical. (s. f.). Difracción de rayos X (XRD): descripción general. [https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction#:~:text=La%20difracci%C3%B3n%20de%20rayos%20X%20\(XRD\)%20es%20la%20%C3%BAnica%20t%C3%A9cnica,el%20espesor%20de%20las%20capas](https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction#:~:text=La%20difracci%C3%B3n%20de%20rayos%20X%20(XRD)%20es%20la%20%C3%BAnica%20t%C3%A9cnica,el%20espesor%20de%20las%20capas).
23. M. Martínez S. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México: 217-217, INIFAP, México, 2013, <https://www.researchgate.net/...o-zonas-aridas.pdf>
24. Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2022, 11 julio). Análisis termogravimétrico (TGA). Mettler-Toledo International Inc. All Rights Reserved. [https://www.mt.com/mx/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20termogravim%C3%A9trico%20\(TGA\)%20se%20usa%20para%20caracterizar%20las%20propiedades,el%20desarrollo%20y%20la%20investigaci%C3%B3n](https://www.mt.com/mx/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20termogravim%C3%A9trico%20(TGA)%20se%20usa%20para%20caracterizar%20las%20propiedades,el%20desarrollo%20y%20la%20investigaci%C3%B3n).
25. Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2023, 12 septiembre). Espectroscopia FTIR. Mettler-Toledo International Inc. All Rights Reserved. https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-

spectroscopy.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20espectroscopia%20FTIR,composici%C3%B3n%20de%20las%20mezclas%20moleculares.

26. Mora Marta C. (05/09/2022). “Resistencia mecánica”. MEXAPEDIA https://www.mecapedia.uji.es/pages/resistencia_mecanica.html#:~:text=La%20resistencia%20mec%C3%A1nica%20es%20la,es%20el%20coeficiente%20de%20seguridad.

27. Nave, R. HyperPhysics. “Thermal Conductivity” (conductividad térmica). Universidad del Estado de Georgia. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/thercond.html#c1>

28. Nuñez Hernandez Diego YOAV (2023). “Concretos vegetales con agregados orgánicos provenientes de los residuos de la cascara de cacahuete: estudio de las propiedades mecánicas, físicas y termicas”. (Tesis de grado maestría). Facultad de Ingeniería Civil, UANL.

29. Ntimugura, F., Vinai, R., Harper, A., & Walker, P. (2020). Mechanical, thermal, hygroscopic and acoustic properties of bio-aggregates – lime and alkali - activated insulating composite materials: A review of current status and prospects for miscanthus as an innovative resource in the South West of England. *Sustainable Materials And Technologies*, 26, e00211. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00211>

30. Ondarse Álvarez, Dianelys (24 de octubre de 2024). Densidad. Enciclopedia Concepto. Recuperado el 24 de octubre de 2024 de <https://concepto.de/densidad/>.

31. Portnov, B. A., Trop, T., Svehkina, A., Ofek, S., Akron, S., & Ghermandi, A. (2018). Factors affecting homebuyers’ willingness to pay green building price premium: Evidence from a nationwide survey in Israel. *Building And Environment*, 137, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.014>

32. Plan de las Naciones Unidas promete enormes reducciones de emisiones en el sector de la construcción, el más contaminante y difícil de descarbonizar. (s. f.). UN Environment. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/plan-de-las-naciones-unidas-promete-enormes-reducciones>

33. Prezi, M. P. A. O. (s. f.). HISTORIA DE LA MAMPOSTERIA. [prezi.com. https://prezi.com/kccym5s312k8/historia-de-la-mamposteria/#:~:text=La%20mamposter%C3%ADa%20se%20desarroll%C3%B3%20por,a%C3%B1os%20despu%C3%A9s%20por%20los%20Incas](https://prezi.com/kccym5s312k8/historia-de-la-mamposteria/#:~:text=La%20mamposter%C3%ADa%20se%20desarroll%C3%B3%20por,a%C3%B1os%20despu%C3%A9s%20por%20los%20Incas).

34. Revista de Obras Públicas. (2022, 8 junio). Evolución hacia una construcción sostenible - Revista de Obras Públicas. <https://www.revistadeobraspublicas.com/experiencias/evolucion-hacia-una-construccion-sostenible/>

35. Rosas Felipe. (2021), "Desarrollo de un material compuesto de matriz a base lechuguilla a base de cemento portland con agregado vegetal lignocelulósico" (Tesis de grado maestría). Facultad de Ingeniería Civil, UANL.

36. Wang, X., Zhang, L., & Cao, H. (2018). *Effects of Alkaline Treatment on the Mechanical Properties of Hemp Fiber Reinforced Cementitious Composites*. *Journal of Composite Materials*, 52(14), 1893-1905.

36. Zhang, L., Sun, C., Liu, H., & Zheng, S. (2016). The role of public information in increasing homebuyers' willingness-to-pay for green housing: Evidence from Beijing. *Ecological Economics*, 129, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.05.010>

37. Zhang, L., Wang, X., & Cao, H. (2020). *Research and application of hemp fiber in green building materials: A review of Heilongjiang Province studies*. *Journal of Natural Fibers*, 17(12), 1785-1798. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612308>

37. IAE, Alianza Global para los Edificios y la Construcción y elaborado por la Agencia Internacional de Energía (2023). *Informe de estado global de 2018 - Hacia un sector de edificios y construcción con cero emisiones, eficiente y resiliente* recuperada el día 7 de septiembre de <https://atradius.com.mx/publicaciones/construction-industry-trends-global-overview-2023-mx.html#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20Agencia%20Internacional%20de,medida%20en%20los%20combustibles%20f%C3%B3siles>.

