

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS, TÉRMICAS Y DE
DURABILIDAD DE BLOQUES COMPUESTOS DE MATRIZ A BASE DE
CEMENTO PORTLAND Y CENIZA VOLANTE CON BIO-AGREGADO DE
YUCCA**

POR

ING. ESTEFANÍA RODRÍGUEZ PÉREZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRIA EN CIENCIAS
con Orientación en Materiales de Construcción**

D i c i e m b r e 2 0 2 5

Tabla de contenido

Capítulo 1- Introducción y generalidades	6
1.1 Introducción	7
1.2 Antecedentes	8
1.3 Planteamiento del problema	17
1.4 Justificación	18
1.5 Hipótesis	19
1.6 Objetivo general.....	20
1.7 Objetivos específicos	20
Capítulo 2- Procedimiento experimental.....	22
2.1 Metodología experimental.....	23
Etapa 1. Obtención de la materia prima.....	25
Etapa 2. Caracterización biológica de la yucca	25
Etapa 3. Caracterización fisicoquímica de los materiales	32
Etapa 4. Tratamiento del bio-agregado	42
Etapa 5. Diseño experimental de la mezcla.....	44
Etapa 6. Fabricación del bloque y especímenes.....	44
Etapa 7- Exposición a ambientes de deterioro.....	46
Etapa 8- Condiciones ambientales durante el periodo de exposición.....	50
Etapa 9- Evaluación del comportamiento térmico.....	51
Etapa 10- Análisis posterior al envejecimiento.....	53
Capítulo 3- Análisis y discusión de los resultados	54
3.1 Caracterización del Cemento Portland	55
3.1.2 Distribución de tamaño de partículas del cemento Portland	55
3.1.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.....	56
3.1.3 Difracción de Rayos X.....	58
3.2 Caracterización de la Ceniza Volante.....	59
3.2.1 Distribución de tamaño de partículas de la ceniza volante.....	59
3.2.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.....	60
3.2.3 Difracción de Rayos X.....	61
3.3 Caracterización biológica de la yucca sin tratamiento	62
3.4 Caracterización fisicoquímica del bio-agregado sin tratamiento y post tratamiento.....	63

3.4.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier sin tratamiento	63
3.4.2 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier post tratamiento	64
3.4.3 Difracción de Rayos X sin tratamiento	66
3.4.4 Difracción de Rayos X post tratamiento	67
3.4.5 Análisis Termo gravimétrico sin tratamiento	70
La figura 29 muestra los resultados del análisis termo gravimétrico del material, el cual permite evaluar su estabilidad térmica y los procesos de degradación asociados a la pérdida de masa en función de la temperatura.	70
3.4.6 Análisis Termo gravimétrico post tratamiento	71
3.5 Determinación de propiedades físicas por recomendaciones RILEM TC 236-BBM	72
SD= Sin Datos	74
3.5.2 Distribución de tamaño de partículas	74
3.5.3 Absorción de agua	75
3.6 Diseño de experimentos	77
3.7 Condiciones ambientales durante el periodo de exposición	81
3.8 Pruebas de los bloques con bio-agregado en la HotBox	82
3.9 Resistencia a la compresión en bloques	85
3.10 Análisis de las pruebas de deterioro	86
3.10.1 Análisis de los bloques en diferentes condiciones mediante DRX	86
3.10.2 Análisis de los bloques en diferentes condiciones mediante FTIR	88
Capítulo 4- Conclusiones y recomendaciones	91
4.1 Conclusiones	92
4.2 Recomendaciones	94
Capítulo 6- Referencias bibliográficas	95
Referencias bibliográficas	96

Tablas de figuras

Figura 1. Ubicación de la Yucca Carnerosana [24]	16
Figura 2. Material vegetal secado a 105°C por 24 horas para determinación de humedad	26
Figura 3. Cenizas de material vegetal	27
Figura 4. Equipo de extracción para la determinación de extraíbles con etanol - tolueno de materiales vegetales	28
Figura 5. Equipo de extracción a vacío empleado para la determinación de lignina insoluble en ácido sulfúrico.	29

Figura 6. Determinación de holocelulosa baño termostatzado.	31
Figura 7. Determinación de α -celulosa y hemicelulosa por el método de NaOH.	32
Figura 8. Mallas utilizadas y proceso de cuarteo.....	34
Figura 9. Multipicnómetro.	37
Figura 10. Molde usado para el cálculo de la densidad aparente.	38
Figura 11. Centrifuga con bolsa permeable e inmersión del bio-agregado.	39
Figura 12. Equipo TEMPOS para medición de conductividad térmica.	40
Figura 13. Preparación del material.	42
Figura 14. Inmersión en agua destilada por 3 horas.	43
Figura 15. Bloques expuestos a la intemperie.	47
Figura 16. Bloques bajo prueba de humedad.	48
Figura 17. Especímenes usados para la Cámara de UV.	50
Figura 18. Esquema experimental para la medición de propiedades térmicas (HotBox).....	52
Figura 19. Distribución del tamaño de partículas del cemento Portland.	55
Figura 20. FTIR del cemento Portland utilizado en la investigación.....	57
Figura 21. DRX del cemento Portland.....	58
Figura 22. Distribución del tamaño de partículas de la ceniza volante.	59
Figura 23. FTIR de la ceniza volante.	60
Figura 24. DRX de la ceniza volante.....	61
Figura 25. FTIR del bio-agregado sin tratamiento.	64
Figura 26. FTIR del bio-agregado post tratamiento.	65
Figura 27. DRX del bio-agregado sin tratamiento.	66
Figura 28. DRX del bio-agregado post tratamiento.	68
Figura 29. TGA del bio-agregado sin tratamiento.	70
Figura 30. TGA del bio-agregado post tratamiento.....	71
Figura 31. Absorción del bio-agregado de yucca.	75
Figura 32. Pareto de resistividad térmica.	78
Figura 33. Pareto rank resistividad térmica.	79
Figura 34. Pareto resistencia a la compresión.	80
Figura 35. Condiciones ambientales durante el periodo de exposición.	81
Figura 36. Evolución de la temperatura en función del tiempo para la verificación del estado estacionario en el ensayo HotBox.....	83
Figura 37. Resistencia a la compresión de los bloques con diferentes condiciones de exposición.....	85
Figura 38. Difractogramas de los bloques a diferentes condiciones.	87
Figura 39. Espectroscopía de los diferentes bloques.	89

$\% \text{Humedad} = (m_o - m_f / m_o \times 100$ Ecuación 1	26
$\% \text{Cenizas} = m_f / (m_o - \text{humedad}) \times 100$ Ecuación 2	27
$\% \text{Extraíbles E - T} = m_f / (m_o - \text{humedad}) \times 100$ Ecuación 3	29

$\% \text{Lignina} = (mfmo) \times 100.$	Ecuación 4	30
$\% \text{Holocelulosa} = mfmo \times 100$	Ecuación 5	30
$\% \text{Celulosa} = (mf/mo) \times 100$	Ecuación 6	32
$\% \text{Hemicelulosa} = \% \text{Holocelulosa} - \% \text{Celulosa}.$	Ecuación 7	32
$V1 = (P1P2) - 1$	Ecuación 8	36
$V2 = (VCel - VRef)V1$	Ecuación 9	¡Error! Marcador no definido.
$\rho = mV$	Ecuación 10	¡Error! Marcador no definido.
$IC \% = ((It - Ia)/It) \times 100$	Ecuación 13	67

Capítulo 1- Introducción y generalidades

1.1 Introducción

La industria de la construcción va en constante ascenso, se estima que la industria crecerá mundialmente en 13.9 billones de dólares hacia 2037, impulsada principalmente por China, Estados Unidos e India [1]. En México, se espera una tasa de crecimiento anual del 4.5% alcanzando un aumento sostenido del mercado aproximadamente a 2.56 billones de pesos mexicanos al 2030 [2]. Este crecimiento en la industria de la construcción demandará una mayor cantidad de materia prima lo que conllevará a un aumento del impacto ambiental por el proceso de extracción de materia prima y la quema de combustibles fósiles, por lo que hace necesario incorporar alternativas que permitan mitigar este impacto. Una alternativa, es el desarrollo de bloques con bio-agregados, que permiten mejores propiedades a comparación de un bloque convencional. En su mayoría este tipo de productos provienen de la industria agrícola permitiendo el aprovechamiento de recursos disponibles, obteniendo materiales novedosos.

La tendencia nos detalla que en la actividad de bloques de concreto operan aproximadamente 5,000 negocios en el país, empleando en conjunto cerca de 27,000 personas [3]. Aunque no se tiene un dato acertado, la presencia de estos números refleja la importancia y demanda de los bloques de concreto en la industria mexicana. Por estos motivos, se busca la creación de productos que nos permitan mitigar esta demanda como el empleo de materiales orgánicos como bloques orgánicos, recubrimientos, ladrillos esto en el desarrollo de materiales de construcción, aportando energéticamente a futuro [4-11]. Dichos esfuerzos de investigación no solo buscan desarrollar materiales que permitan disminuir este impacto, sino coadyuvar a mejorar las prestaciones de comportamiento térmico y de durabilidad.

El propósito de esta investigación es crear una estrategia que permita utilizar fuentes renovables de materia prima de origen biológico con el potencial uso como bio-agregado, en la fabricación de bloques mejorando sus prestaciones de

comportamiento térmico como material aislante. Con el objetivo de coadyuvar a mitigar el uso de sistemas de climatización. Por estas razones, se pretende elaborar bloques utilizando agregado vegetal de *yucca carnerosana*, para emplearlo como bio- agregado sustituyendo parcialmente el agregado pétreo. La yucca pertenece a la familia *Asparagaceae* igual que el agave, el cual ha sido ampliamente reportado como bio-agregado [4]. Lo cual permitirá que la yucca se comporte como un bio-agregado, que pueda lograr baja conductividad térmica al ser un material orgánico.

Los bio-materiales se consideran materiales alternativos de construcción, que pueden ser empleados para la elaboración de bloques orgánicos [12]; al emplear un bio-agregado, se pretende obtener un material con buenas propiedades de aislamiento térmico y a su vez una aceptable resistencia como bloque no estructural. Así mismo como es un material de construcción, se requiere el estudio del deterioro en ambientes externos y húmedos, en un determinado periodo de tiempo. Ya que, al ser un material orgánico este tiende a deteriorarse con el ambiente.

Esta investigación plantea evaluar el comportamiento de un bio- agregado previamente tratado con el uso del tratamiento de hornificación [13], de igual forma evaluar sus propiedades fisico-mecánicas y de durabilidad de bloques compuestos con bio-agregado de yucca.

1.2 Antecedentes

La actividad constructiva es un pilar esencial para el desarrollo socioeconómico global y la infraestructura. No obstante, el impacto que genera el sector de la construcción no solo es positivo al impulsar el progreso y la funcionalidad urbana, sino que a su vez genera un impacto negativo en el ambiente [4].

Los bio-agregados son productos que provienen de la naturaleza como es la materia orgánica o residuos agrícolas. Estos materiales orgánicos como es el caso de la yucca brindan propiedades aislantes térmicas, lo que hace al agregado

una alternativa a futuro de convertirse como un material de construcción innovador. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, su aplicación como material conlleva ciertas desventajas, destacando así la fragilización inherente de su estructura. Este fenómeno lo conduce a un deterioro y como consecuencia a un bajo uso dentro del sector [4]. Las partículas orgánicas o bien bio-agregados, a comparación de las fibras sintéticas presentan pocas investigaciones como un material alterno en investigaciones académicas o científicas.

El hecho de no investigar sobre los bio-agregados posiblemente se deba a que presenta deficiencias, como la durabilidad, resistencia, alta absorción de agua entre otros parámetros; trabajos concluyen [13-15] que se debe a la reacción generada entre la alcalinidad de la pasta de cemento y las fibras naturales, además de la susceptibilidad a ataques de microorganismos presentes por humedad [5].

En la incorporación de un concreto vegetal, en el estado de Nuevo León en donde se tienen plantas no cultivadas para su existencia, la yucca carnerosana entra como una alternativa de bio-agregado. Dado que, se encuentra fácilmente en el centro norte del país, por lo que, es sencillo de utilizarla y no se encuentra bajo algún criterio de protección, haciéndola abundante [16]. Para esto mismo, no se encuentran publicaciones sobre la utilización de esta planta como bio-agregado o algo con la misma similitud. Sin embargo, se han publicado estudios acerca del *Agave salmiana* como uso de bio- agregado [4,5], el cual en base a investigaciones se conoce que es de la misma familia de la yucca. Por lo tanto, se utilizarán las referencias en base a esta planta.

De acuerdo con Rosas D.[4], el concreto de origen vegetal está constituido por una mezcla de partículas lignocelulósicos y un aglutinante mineral, combinación que contribuye a mejorar las propiedades higrotérmicas del material, particularmente al reducir su conductividad térmica. En este contexto, el presente estudio evaluó el uso de *Agave Salmiana*, como sustituto total del agregado fino

calizo en la fabricación de concreto. Los resultados mostraron que la médula presenta una capacidad de absorción de agua 24.13% mayor que la cutícula, lo cual coincide con lo reportado en la literatura respecto a la elevada absorción y retención de agua asociada a la alta porosidad de los materiales lignocelulósicos [17]. Para la elaboración del material compuesto se utilizó cemento portland en combinación con el bio-agregado de agave, aplicando distintos tratamientos con el fin de preservar sus propiedades físicas. Entre ellos, el tratamiento de hornificación presentó el mejor desempeño, ya que favoreció una interacción más adecuada entre el bio-agregado y la matriz cementante.

En relación con los tratamientos aplicados a los bio-agregados, Jácome *et al.*[18] señalan que antes de su incorporación en materiales cementantes es recomendable realizar un pre-lavado, con el objetivo de eliminar compuestos hidrosolubles, principalmente sacarosa. La eliminación de estas sustancias es importante, ya que su presencia puede provocar una mayor retención de humedad y afectar el comportamiento del material dentro de la matriz cementante. Posteriormente, puede aplicarse el tratamiento de hornificación, el cual corresponde a un método físico que consiste en someter el bio-agregado a ciclos sucesivos de humedecimiento y secado [18]. Este proceso contribuye a reducir el contenido de azúcares y otros compuestos solubles presentes en los materiales lignocelulósicos, favoreciendo así una mejor compatibilidad con el cemento.

Ballesteros *et al.* [7] estudiaron sobre el efecto y el potencial del proceso de hornificación como pretratamiento sobre fibras celulósicas de eucalipto y pino aplicando cuatro ciclos de humedecimiento y secado. Para ello, realizaron caracterizaciones mediante pruebas físicas, químicas y morfológicas con el objetivo de evaluar su posible uso como materiales alternativos de refuerzo en matrices cementicias. En su investigación se plantea que la capacidad de refuerzo de las fibras de celulosa pueden disminuir con el tiempo, especialmente cuando los materiales están expuestos al intemperismo, lo que puede provocar un comportamiento mecánico más frágil en los compuestos cementicios. Como

alternativa para mitigar este problema, se propone reducir la alcalinidad de la matriz o aplicar tratamientos físicos, químicos o mecánicos a las fibras. Los resultados del estudio mostraron que la hornificación reduce la absorción de agua y el hinchamiento de las fibras, lo que favorece una mayor estabilidad dimensional, disminuye su degradación y contribuye a la preservación de sus componentes celulósicos cuando se emplean como refuerzo en materiales a base de cemento.

Con el fin de evaluar la durabilidad de las fibras en materiales cementicios Leyva C. [15], realizó diversos ensayos de envejecimiento acelerado para analizar su degradación a lo largo del tiempo y su comportamiento frente a absorción de humedad. Entre las metodologías empleadas se incluyeron ciclos de humedecimiento-secado, inmersión en agua a elevada temperatura y exposición a condiciones ambientales naturales.

Uno de los procedimientos consistió en someter las muestras a 17 ciclos consecutivos, donde cada ciclo incluyó un periodo de humedecimiento de un día seguido por tres días de secado a una temperatura aproximada de 21°C. Asimismo, se realizó una prueba adicional basada en la exposición directa al ambiente durante 74 días, con el fin de analizar la influencia de las condiciones ambientales sobre la estabilidad y el deterioro de las fibras.

Lira R. [5], investigó el uso del agave como bio-agregado en materiales de cementicios, evaluando el comportamiento físico-mecánico de distintos especímenes expuestos a ambientes agresivos. En el estudio se aplicaron dos tipos de tratamientos al agregado vegetal: recubrimiento con parafina y ciclos de hornificación.

Los resultados obtenidos a partir de ensayos de resistencia a compresión indicaron que el tratamiento por hornificación favoreció notablemente el comportamiento mecánico del material, evidenciando una mejor interacción con la matriz cementante y un posible incremento en la durabilidad. Por otro lado, el tratamiento con recubrimiento de parafina no mostró valores satisfactorios de

resistencia mecánica; no obstante, si contribuyó a optimizar las propiedades de aislamiento térmico.

La evaluación de la durabilidad ha sido un factor importante que tomar en cuenta para el uso de bio- agregados. El cual da como resultado requisitos de rendimiento a largo plazo.

La durabilidad es la capacidad de realizar una función hasta que se alcanza un estado limite [19]. En este estudio se midió la resistencia a la compresión de concreto con cáñamo almacenados hasta un año en diferentes ambientes. Se obtuvo una resistencia favorable en función con el tiempo, pero, de igual forma se fue disminuyendo. Concluyendo que, debido a su reciente desarrollo, pocos estudios se han centrado en evaluar la durabilidad de bio-agregados. Fue complicado encontrar los principales mecanismos de degradación, por lo que es un área de oportunidad para futuras investigaciones.

Últimamente se han empezado a adoptar nuevas técnicas de caracterización en bio-agregados para poder obtener datos más eficientes y claros de lo que contienen este tipo de material al ser utilizados en la industria. RILEM, ha elaborado un protocolo de recomendaciones para caracterizar este tipo de material llamado bio-agregado. Está investigación es realizada por un grupo de trabajo dentro del comité técnico 236-BBM de RILEM [20]. Se relaciona con el estudio de materiales de construcción hechos a partir de partículas vegetales. En este protocolo se pretende medir el contenido inicial de agua, la densidad aparente, la absorción de agua, la granulometría de las partículas y la conductividad térmica.

Marceau S *et al.* [8] analizaron la durabilidad de materiales de origen vegetal después de ser sometidos a procesos de envejecimiento en distintos entornos de exposición. A partir de este estudio se establecieron recomendaciones técnicas orientadas a optimizar la durabilidad de los materiales y a estimar su vida útil en función de las condiciones ambientales. En particular, se evaluó la influencia del agregado vegetal de cáñamo en las propiedades del material endurecido, así

como el efecto de ciclos de humedecimiento y secado durante 75 días sobre la microestructura y las propiedades funcionales del material. Asimismo, se analizaron los factores que pueden favorecer el desarrollo de moho en este tipo de compuestos. Los resultados indicaron que la exposición a ciclos de humedad puede propiciar la presencia eventual de microorganismos en concretos de cañamo y en algunas muestras analizadas. También se observó una ligera variación en las propiedades físicas del material, atribuida posiblemente a la continuación de las reacciones de hidratación del ligante en presencia de agua, lo que influye en su densificación y en la evolución de su microestructura.

Delannoy G *et al.* [9] estudiaron las condiciones de envejecimiento de los materiales vegetales para evaluar su durabilidad, en donde se eligieron dos condiciones: La primera es un ambiente estático y controlado, utilizado como referencia. La segunda es un proceso de envejecimiento acelerado, que consiste en aplicar ciclos de humectación y secado de las muestras, variando la humedad relativa, a una temperatura favorable para el desarrollo de microorganismos. Como resultado de estudio no se observaron variaciones significativas en las propiedades químicas, microestructurales ni funcionales, ni en términos de comportamiento térmico, acústico, hídrico ni mecánico. Se opta por el envejecimiento acelerado en cámara climática para evaluar la evolución de los hormigones de cañamo al someterse a ciclos que alternan periodos de alta humedad relativa (5 días al 98 % HR) con fases de secado a menor humedad relativa (2 días al 40 % HR). Se observan desarrollo de hongos en el interior de los áridos y los fenómenos de hinchamiento y contracción durante los ciclos de humectación y secado lo que provoca la apertura de algunas porosidades de las partículas vegetales que inicialmente estaban cerradas.

Phetcharat S. *et al.* [10] evaluaron las propiedades y durabilidad de bloques con bio-agregado de cañamo. Las propiedades se mejoraron mediante la incorporación de $Al_2(SO_4)_3$, látex de caucho natural y polímeros. Las muestras se curaron al aire durante 28 días y se sometieron a 12 ciclos de humectación y secado, tras lo cual se evaluaron su resistencia a la compresión, absorción de

agua y densidad en seco. Los resultados demostraron que la incorporación de un 15 % de $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_3$ mejoró la resistencia a la compresión, con valores de 5,41 MPa después del curado al aire, lo que aumentó un 111,33 % en comparación con el concreto de cáñamo sin mejora. Tras 12 ciclos de humectación y secado, la resistencia a la compresión fue de 5,55 MPa. Además, la conductividad térmica se registró en 0,16 W/m°C y una densidad de 1260 kg/m³. Estos resultados indicaron que los bloques entrelazados reforzados con cáñamo con un 15 % de $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_3$ no solo cumplían con los estándares de resistencia, sino que también ofrecían propiedades de eficiencia energética, lo que los hacía adecuados para la construcción sostenible.

Esta investigación Andreola V. *et al.* [11] presenta estudios de durabilidad natural realizados en bio- concreto de bambú, producido con un 50% de partículas de bambú. Se probó un tratamiento superficial mediante la aplicación externa de resina para reducir la penetración de agua durante la intemperie. Se expusieron a condiciones climáticas naturales y externas durante doce meses, y se recopilaron registros meteorológicos durante el período de estudio. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión mostraron que la tensión y el módulo de elasticidad disminuyeron significativamente tras la intemperie externa, para el bio-concreto con tratamiento disminuyó un 52% en 12 meses y sin tratamiento si tuvo una disminución más alta del 72%.

Collet *et al* [21], estudiaron los efectos del envejecimiento Ambiental en el comportamiento mecánico de un biocompuesto a base de fibras de cáñamo, utilizado como material de refuerzo estructural. En su investigación, las muestras fueron sometidas a diferentes condiciones ambientales con el fin de analizar cómo factores como la humedad, la temperatura y los ciclos de envejecimiento influyen en sus propiedades mecánicas. Los resultados mostraron que la exposición prolongada a estos factores puede provocar cambios en la microestructura del material, lo que afecta su resistencia mecánica y su estabilidad dimensional. No obstante, también se observó que, bajo ciertas condiciones, los biocompuestos mantienen un comportamiento mecánico

adecuado, lo que demuestra el potencial de los materiales lignocelulósicos como alternativa sostenible en aplicaciones de refuerzo estructural.

Onyenokporo *et al.* [22], estudiaron el desempeño térmico de bloques de mampostería a base de cemento incorporando ceniza de cáscara de arroz como material suplementario. En su investigación se elaboraron diferentes mezclas en las que el cemento portland fue sustituido parcialmente por 5%, 10%, 15% de RHA (Rice Husk Ash), con el objetivo de analizar su influencia en las propiedades térmicas del material.

Los resultados mostraron que el incremento en el contenido de ceniza de cáscara de arroz contribuye a reducir la conductividad térmica y el coeficiente de transmitancia térmica (valor U) de los bloques, lo que mejora el comportamiento térmico de los sistemas de mampostería. Además se observó que la incorporación de este residuo agrícola representa una alternativa sostenible para el aprovechamiento de desechos agroindustriales y para el desarrollo de materiales de construcción con mayor eficiencia energética.

Kuznik *et al.* [23] desarrollaron y ajustaron un sistema tipo HotBox orientado al análisis del comportamiento térmico de materiales y elementos constructivos. El equipo fue diseñado para generar una diferencia de temperatura controlada entre dos cámaras, permitiendo cuantificar el flujo de calor a través de las muestras y estimar propiedades como la conductividad y la transmitancia térmica.

Durante su implementación, el equipo fue sometido a un proceso de ajuste y verificación con el propósito de garantizar condiciones cercanas al estado estacionario, así como reducir pérdidas térmicas que pudieran influir en la exactitud de las mediciones. Los resultados obtenidos indicaron que el sistema es capaz de proporcionar datos consistentes sobre el comportamiento térmico de diversos materiales, facilitando su evaluación en términos de aislamiento térmicos y eficiencia energética

La yucca también conocida como palma samadoca, corresponde a una especie perteneciente a la familia de las *Asparagaceae*. La planta se desarrolla inicialmente como una roseta de hojas largas y estrechas que irradian desde el suelo, pero eventualmente la roseta corona un tronco de 1.5 a 6 m de altura. Los troncos rara vez están ramificados es una característica que ayuda a distinguir la palma samandoca de otras especies de *Yucca* creciendo en la región del centro norte de México.

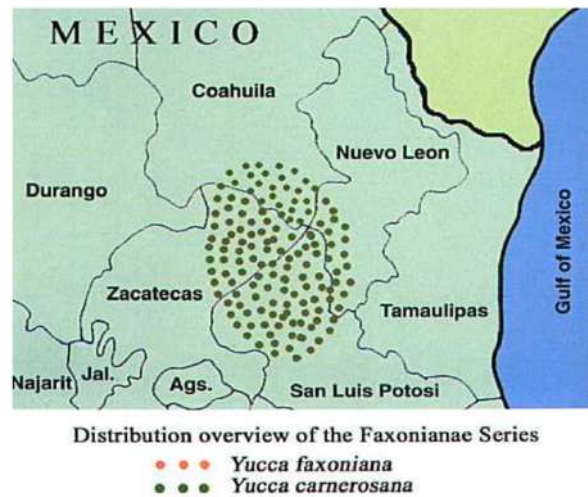


Figura 1. Ubicación de la *Yucca Carnerosana* [24]

Las hojas que coronan el tronco son de un verde oscuro y opaco, 60-110 cm de largo, 6-8 cm de ancho y 4-8 mm de espesor. Son cóncavos, rígidos y terminan en una punta afilada, con fibras gruesas, marrones y rizadas que se proyectan fuera de la márgenes cerca del punto. Al igual que la lechuguilla, las hojas exteriores son duras y la fibra (ixtle de palma) se extrae de las hojas más jóvenes y tiernas del cogollo [24].

Como se muestra en la figura 1 [24], se puede percatar en donde se encuentra distribuida la especie, en la que abarca, Nuevo León, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosi y Tamaulipas.

Tratamiento de hornificación

El proceso de hornificación describe los cambios que experimentan las fibras celulósicas cuando son sometidas a ciclos de secado y rehidratación, lo que modifica principalmente su estructura superficial y su comportamiento frente al agua [25].

Este tratamiento se basa en la aplicación controlada de ciclos de humedecimiento

y secado, los cuales generan una reorganización interna en la fibra. Como resultado, se reduce la cantidad de grupos hidrofílicos disponibles, disminuyendo su afinidad por el agua.

Entre los efectos más relevantes de la hornificación se encuentran la reducción de la porosidad, la disminución de la capacidad de hinchamiento y cambios en propiedades como la flexibilidad y la adhesión en condiciones húmedas. Asimismo, se ha reportado un incremento en el grado de cristalinidad debido a la reorganización estructural de la celulosa [25] [26].

Diversos estudios han señalado que los materiales que incorporan fibras sometidas a este tratamiento pueden presentar mejoras en sus propiedades físicas, lo cual se asocia con una menor generación de vacíos dentro de la matriz [4][27][28].

1.3 Planteamiento del problema

En México, como en varios países se busca garantizar el acceso a vivienda digna, sustentable con el entorno natural, utilizando principalmente los recursos de la región. Se quiere contribuir a futuro con la reducción del consumo energético en viviendas, derivado por el clima de la zona semidesértica del estado de Nuevo León. Dándole una utilización a los recursos naturales disponibles de esta zona como es el caso de la *yucca carnerosana*, reemplazando un porcentaje del agregado pétreo por el bio- agregado en bloques de construcción.

Los materiales compuestos por bio-agregados y fibras naturales presentan dificultades en la matriz cementante tales como: la bio-degradación en el medio ambiente, la descomposición, pérdida de la resistencia, la humedad y absorción del agua. En el caso mecánico y estructural suele ser un decremento en la resistencia mecánica por la baja densidad del bio-agregado. También se ha reportado [4-11] que la incorporación de bio-agregados tiene efecto negativo dentro de la matriz cementante al hidratar el cemento los bio-agregados absorben agua de mezcla interfiriendo con el tiempo de fraguado el cual suele ser mas lento y menos controlado.

Como se menciono anteriormente, al sustituir el agregado pétreo con el bio-agregado, el cemento portland disminuye su uniformidad y la compatibilidad entre los agregados; debido a los hidrosolubles presentes en la materia vegetal como la celulosa, lignina, azúcares, hemicelulosa, entre otros. La naturaleza química de este tipo de materiales pétreos presentes en el cemento es alcalina, lo que conlleva a que su interacción con la lignina y la hemicelulosa presentes en sus partículas de los bio-agregados se disuelvan por la acción del hidróxido de calcio, provocando su fragilización [14]. Investigadores han optado por el método de hornificación para la eliminación de los hidrosolubles dando buenos resultados[4-6]. Se ha evidenciado que el uso de un pretratamiento ayuda a la extracción de dichos hidrosolubles y a mejorar la compatibilidad de la matriz vegetal con la matriz cementante mejorando sus propiedades fisicoquímicas y fisico- mecánicas para su potencial uso como bio-agregado en la fabricación de bloques de mampostería con propiedades térmicas mejoradas y de durabilidad.

En esta investigación se pretende evaluar las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de bloques compuestos de matriz a base de cemento portland con bio-agregado de yucca expuestos a diferentes pruebas de deterioro bajo condiciones de intemperismo acelerado.

1.4 Justificación

El empleo de materiales orgánicos ha ido en ascenso como un material alternativo novedoso que se nos comunica que ayudará a reducir el consumo energético generado por la industria de la construcción. Dado que, no solo se busca desarrollar materiales que reduzcan el impacto energético, sino que nos permitan tener propiedades atractivas como su comportamiento térmico y de durabilidad. Sin embargo, existe evidencia que la compatibilidad matriz cementante/bio-agregado es muy pobre o casi nula.

Por consiguiente, el uso de un bio-material en su estado crudo no es viable; hace evidente la necesidad de dar un pretratamiento al bio-agregado de yucca. Debido a lo anterior, se propone emplear un pretratamiento de hornificación en el

agregado vegetal para mejorar dicha compatibilidad con la matriz cementante [4-6].

La presente investigación se enfoca en evaluar el impacto en la durabilidad a diferentes edades de bloques compuestos con bio-agregado. Para ello, se empleó *yucca carnerosana* un recurso natural de la región del estado de Nuevo León, abundante en el centro norte de México. Debido a su disponibilidad y a sus propiedades lignocelulósicas, esta especie representa una alternativa viable para su aprovechamiento como material de construcción. Asimismo, se evaló el comportamiento térmico de los bloques mediante el método HotBox, con el objetivo de analizar su capacidad de aislamiento térmico y su desempeño frente a condiciones ambientales, considerando la influencia del bio-agregado en la estructura porosa del material.

A la par se estudio el diseño de mezcla, incorporando ceniza volante para mejorar las propiedades mecánicas y físicas de los bloques, se ha reportado que la incorporacion de la ceniza volante ayuda a mejorar propiedades como la trabajabilidad al homogenizar la mezcla, incrementando su durabilidad [29-32].

Esta propuesta de investigación tuvo como objetivo desarrollar la metodología para la fabricación de bloques con bio-agregado de yucca y estudiar el desempeño de los bloques con bio-agregado en condiciones de intemperismo acelerado para clasificar su comportamiento de durabilidad como materiales de construcción.

1.5 Hipótesis

La fabricación de bloques con agregado vegetal de *Yucca carnerosana* sometido a un tratamiento de hornificación y con la incorporación de una puzolana, permitirá obtener un mejor desempeño físico-mecánico, térmico y de durabilidad en comparación con otros tratamientos, al ser expuestos a condiciones de intemperismo acelerado. Se espera que los bloques desarrollados cumplan con los criterios establecidos en la norma NMX-C-411-ONNCCE-2015 [33],

correspondiente a bloques huecos de concreto no estructurales, asegurando su viabilidad técnica y funcional como material de construcción.

1.6 Objetivo general

Desarrollar bloques y especímenes con bio-agregado vegetal de *Yucca carnerosana* en una matriz de cemento Portland, mediante la sustitución parcial del agregado pétreo y la aplicación de un tratamiento de hornificación, con el propósito de evaluar su comportamiento mecánico, térmico y de durabilidad bajo diferentes condiciones ambientales.

1.7 Objetivos específicos

- Establecer la composición biológica de la yucca mediante la caracterización química con las pruebas de TAPPI T 257 cm-85, TAPPI T264 cm-97, TAPPI T211 om-93, TAPPI T204 cm-97, TAPPI T222 om-98 [34], Contenido en holocelulosa y determinación de α -celulosa y hemicelulosa.
- Realizar el tratamiento de hornificación en la materia vegetal para la eliminación de sus hidrosolubles y materia orgánica presentes en la composición biológica del bio-agregado.
- Realizar la caracterización del bio-agregado de acuerdo con las recomendaciones del comité RILEM TC 236-BMM [20], con el propósito de determinar los parámetros físicos requeridos para el diseño de la mezcla.
- Diseñar una mezcla óptima con una sustitución parcial del agregado pétreo por el bio-agregado de yucca e incorporación de ceniza volante, mediante el uso de un software de diseño experimental, con el fin de obtener una mezcla homogénea en la matriz cementante y un tiempo de fraguado adecuado de 24 horas.
- Monitorear las variables meteorológicas durante el periodo de exposición de los bloques mediante una estación meteorológica, con el propósito de evaluar la

influencia de las condiciones ambientales en el desempeño y durabilidad del material.

- Evaluar la transmitancia térmica (valor U) de los bloques elaborados con agregado vegetal tratados mediante hornificación, utilizando el método de HotBox, con el fin de analizar su desempeño térmico y compararlo con el de un bloque de control.

- Evaluar los bloques orgánicos con la prueba de resistencia compresión, después de estar expuesto a la intemperismo acelerado a diferentes tiempos al compararlo con un bloque de control.

- Analizar la interacción entre el bio-agregado de yucca y la matriz cementante mediante técnicas químicas, considerando especímenes de mortero sometidos previamente a ensayos de deterioro acelerado y evaluación térmica tipo HotBox (DRX y FTIR).

Capítulo 2- Procedimiento experimental

2.1 Metodología experimental

En este capítulo se describe el procedimiento experimental y las técnicas de caracterización empleadas en la presente investigación. La experimentación consistió en determinar las propiedades físicas, mecánicas de la *yucca carnerosana* con el propósito de evaluar su durabilidad como bio-agregado. Para ello, el material vegetal fue sometido a un tratamiento de hornificación, con el fin de modificar sus características y mejorar su compatibilidad con la matriz cementante. El programa experimental se estructuró en diferentes etapas, las cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Etapas para llevar a cabo la investigación.

Etapa 1- Obtención de las materias primas.	- Recolección de los materiales principales utilizados en la investigación. - Obtención del material vegetal (<i>Yucca Carnerosana</i>) en condición natural.
Etapa 2- Caracterización biológica de la yucca.	- Determinación de las propiedades biológicas de la <i>Yucca Carnerosana</i> mediante métodos experimentales basados en normas TAPPI [34].
Etapa 3- Caracterización fisicoquímica de los materiales.	- Caracterización del bio-agregado siguiendo las recomendaciones RILEM TC-236-BBM [20]. - Determinación de la composición química del bio-agregado, cemento y ceniza volante mediante DRX, FTIR y TGA.

Etapa 4- Tratamiento del bio-agregado.	- Aplicación del tratamiento de hornificación al material vegetal.
Etapa 5- Diseño experimental de la mezcla.	- Elaboración del diseño de experimentos para la formulación de las mezclas mediante el software “Design Expert”.
Etapa 6- Fabricación de bloques y especímenes	- Producción de bloques y probetas conforme a las especificaciones de la norma NMX–C–411–ONNCCE–2015 [33] para bloques y la norma ASTM-C109 [35].
Etapa 7- Exposición a ambientes de deterioro.	- Exposición de las muestras a diferentes condiciones ambientales: intemperie, humedad y cámara UV.
Etapa 8- Condiciones ambientales durante el periodo de exposición	- Registro de variables meteorológicas durante el periodo de exposición de los bloques.
Etapa 9- Evaluación del comportamiento térmico.	- Determinación de las propiedades térmicas mediante el método HotBox siguiendo la normativa ASTM C1363 [36].
Etapa 10- Análisis posterior al envejecimiento.	- Conductividad térmica y resistencia a la compresión. -Caracterización mediante DRX y FTIR.

Etapas 1. Obtención de la materia prima

Las materias primas empleadas en la presente investigación fueron cemento, arena, ceniza volante y *Yucca carnerosana*. El material cementante utilizado corresponde a cemento portland CPC 30R. La ceniza volante empleada en este estudio proviene de la planta carboeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicada en Nava, Coahuila, México.

La arena número 4 utilizada corresponde a un agregado fino, caracterizado por presentar un tamaño máximo de partícula de 4.75 mm, lo que implica que el material pasa completamente el tamiz No. 4. Esta granulometría favorece una correcta distribución de los vacíos y una buena interacción con la matriz cementante, lo cual resulta especialmente relevante en sistemas que incorporan bio-agregados, ya que contribuye a mejorar la cohesión del material y el desempeño mecánico del compuesto.

Por otra parte, el bio-agregado vegetal (*Yucca carnerosana*) fue recolectado en el municipio de Cadereyta Jimenez Nuevo León, México.

Etapas 2. Caracterización biológica de la yucca

Análisis de la humedad (TAPPI T264cm-97) [34]

El contenido de humedad se evaluó utilizando muestras de aproximadamente $2.00 \pm 0.01\text{g}$, las cuales fueron colocadas en recipientes previamente acondicionados y sometidas a secado en estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24 h. Tras el secado, se dejaron enfriar en un desecador hasta alcanzar condiciones ambientales. La masa obtenida al final del proceso (m_f) se utilizó para calcular el contenido de humedad empleando la ecuación 1:

$$\% \text{Humedad} = ((m_o - m_f)/m_o) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

m_o = masa inicial

m_f = masa final



Figura 2. Material vegetal secado a 105°C por 24 horas para determinación de humedad

Análisis de cenizas a 525°C (TAPPI T211cm-93) [34]

Para la determinación de cenizas, se emplearon muestras de $1.00 \pm 0.01\text{g}$, las cuales fueron sometidas a calcinación en mufla a 525° C durante 3 h. Tras el enfriamiento en desecador, se registró la masa residual para determinar el contenido de cenizas, obteniendo así la ecuación 2.

$$\% \text{ Cenizas} = m_f / (m_o - \text{humedad}) \times 100 \quad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde:

m_f = masa final

m_o = masa inicial



Figura 3. Cenizas de material vegetal

Extraíbles con etanol-tolueno (TAPPI T204 cm-97) [34]

A través de este análisis se evaluó la cantidad de sustancias no volátiles solubles en disolventes orgánicos contenidas en la materia prima, entre las que se incluyen ceras, lípidos, algunas resinas, hidrocarburos entre otras.



Figura 4. Equipo de extracción para la determinación de extraíbles con etanol - tolueno de materiales vegetales

El contenido de extractivos se obtuvo mediante extracción Soxhlet utilizando una mezcla de etanol-tolueno. Se emplearon aproximadamente $4.0 \pm 0.1\text{g}$ de muestra, sometidas a reflujo durante 6 h, asegurando múltiples ciclos de extracción. Posteriormente, el material fue secado a 105°C y la diferencia de masa permitió calcular el porcentaje de extractivos. Al final se obtuvo mediante la ecuación 3:

$$\% \text{Extraíbles E - T} = m_f / (m_o - \text{humedad}) \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

m_f = masa final

m_o = masa inicial

Contenido en lignina insoluble en ácido (TAPPI T222 cm-98) [34]

La lignina se cuantificó mediante hidrólisis ácida. Se trataron $1.0 \pm 0.1\text{g}$ de muestra libre de extractivos con ácido sulfúrico al 72% durante 2 h a temperatura ambiente, seguido de dilución y tratamiento a reflujo por 4 h. El residuo insoluble se filtró, secó y pesó para determinar el contenido de lignina con la ecuación 4:



Figura 5. Equipo de extracción a vacío empleado para la determinación de lignina insoluble en ácido sulfúrico.

$$\%Lignina = \left(\frac{m_f}{m_o}\right) \times 100. \quad \textbf{Ecuación 4}$$

Donde:

m_f = masa final

m_o = masa inicial

Contenido en holocelulosa (Método de Wise y col.) [37]

La holocelulosa se determinó mediante tratamiento con clorito de sodio en medio ácido, manteniendo la mezcla 70°C durante varias horas con adiciones periódicas de reactivos. El residuo obtenido se filtró, secó y cuantificó la holocelulosa con la siguiente ecuación:

$$\%Holocelulosa = \left(\frac{m_f}{m_o}\right) \times 100 \quad \textbf{Ecuación 5}$$

Donde:

m_f = masa final

m_o = masa inicial

En la figura 6, se muestra el montaje experimental utilizado para la determinación de holocelulosa mediante baño termostatzado.



Figura 6. Determinación de holocelulosa baño termostatzado.

Determinación de α -celulosa y hemicelulosa (Método de Rowell)[38]

Finalmente, la α -celulosa se obtuvo a partir de la holocelulosa mediante tratamiento con soluciones de NaOH. La fracción insoluble se separó, lavó, neutralizó y secó, determinándose gravimétricamente. La hemicelulosa se calculó por diferencia respecto a la muestra inicial. Las cantidades se obtienen de los cálculos siguientes:

$$\% \text{Celulosa} = (m_f/m_o) \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

m_f = masa final

m_o = masa inicial

$$\% \text{Hemicelulosa} = \% \text{Holocelulosa} - \% \text{Celulosa.} \quad \text{Ecuación 7}$$



Figura 7. Determinación de α -celulosa y hemicelulosa por el método de NaOH.

Etapas 3. Caracterización fisicoquímica de los materiales

Es importante la caracterización de los materiales a utilizar de manera individual para tener una proyección de cómo se comportará el material. Cabe mencionar

que las pruebas en esta investigación se desarrollaron por triplicado para evitar resultados erróneos.

3.1 Distribución de tamaño de partículas de los agregados

Es necesario conocer los porcentajes de distribución de los agregados porque esta información es importante para entender el comportamiento. Porque una buena distribución nos proporciona un buen acomodamiento de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de flexión y compresión. En este caso, la distribución de partículas del agregado nos proporcionará una curva granulométrica, la cual indica como se está comportando o bien cual es la tendencia del material.

El análisis granulométrico del cemento Portland se llevó a cabo mediante difracción láser utilizando un equipo Microtac modelo S3500. Esta técnica permite obtener la distribución del tamaño de partícula a partir de la interacción de un haz láser con el material, generando información representativa de sus características granulométricas.

De manera similar, la ceniza volante fue caracterizada mediante el mismo equipo y bajo condiciones equivalentes, con el propósito de determinar su distribución de tamaño de partícula y asegurar la comparabilidad de los resultados con respecto al cemento.

En el caso del bio-agregado de yucca, la caracterización granulométrica se realizó mediante tamizado manual, siguiendo las recomendaciones establecidas por RILEM TC-236-BBM [20]. Este procedimiento consistió en la separación del material en distintas fracciones de tamaño empleando un conjunto de tamices seleccionados en función de la naturaleza del material.

Previo al ensaye, el bio-agregado fue sometido a un proceso de secado en horno con ventilación (Masters modelo A005-08KIT) a una temperatura de $60^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 h, con el objetivo de eliminar la humedad presente. Posteriormente, se

aplicó un proceso de cuarteo para garantizar la obtención de muestras representativas.

El tamizado se efectuó utilizando las mallas 4 (4.75 mm), 8 (2.36 mm), 16 (1.18 mm) y 30 (0.60mm), empleando aproximadamente 100 g de muestra por ensayo. El proceso se llevó a cabo durante 30 minutos para asegurar una adecuada separación de las partículas. Finalmente, se determinaron los porcentajes retenidos y pasantes en cada tamiz, cuyos resultados se presentan en la figura 8.



Figura 8. Mallas utilizadas y proceso de cuarteo.

3.2 Densidad

La densidad es una propiedad física que relaciona la masa de un material con el volumen que ocupa, permitiendo describir su comportamiento y características en función de su estructura.

Para la determinación de la densidad del cemento Portland y la ceniza volante, ambos en forma de polvo, se utilizó un multiplicómetro de gas (Quantachrome modelo MVP-D160E), mostrado en la figura 9. Este equipo opera mediante el uso de nitrógeno como gas de trabajo, lo que permite obtener el volumen real del material a partir de mediciones de presión controladas.

El procedimiento consistió en colocar la muestra en la celda de medición utilizando el adaptador correspondiente, seguido del cierre inicial de las válvulas del sistema. Posteriormente, se realizaron ciclos de purga con el fin de estabilizar las condiciones internas del equipo, ajustando el sistema hasta alcanzar una presión base cercana a cero.

Una vez estabilizado, se llevaron a cabo mediciones en las posiciones de referencia y celda, registrando los valores de presión correspondientes en cada etapa del ensayo. Estas lecturas permitieron obtener los parámetros necesarios para el cálculo del volumen del material.

Finalmente, la densidad se determinó a partir de los valores medidos por el equipo, mediante el cálculo del volumen y su relación con la masa de la muestra como se muestra en las ecuaciones 8,9 y 10.

$$V_1 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{-1} \quad \textbf{Ecuación 8}$$

Donde:

V_1 =Volumen

P_1 = Presión inicial

P_2 = Presión final

$$V_2 = (V_{\text{Cel}} - V_{\text{Ref}})^{V_1} \quad \textbf{Ecuación 9}$$

Donde:

V_2 = Volumen

V_{Cel} = Volumen de la celda donde se coloca la muestra

V_{Ref} = Volumen de referencia del equipo

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \textbf{Ecuación 10}$$

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa

V = Volumen



Figura 9. Multipicnómetro.

Para el bio-agregado de yucca, la densidad aparente se determinó siguiendo las recomendaciones establecidas por RILEM TC 236-BBM [20]. Para ello, se utilizó material previamente secado a 60°C y un molde cilíndrico de PVC con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura (figura 10).

El procedimiento consistió en determinar inicialmente la masa del molde vacío, tras lo cual se introdujo el bio-agregado hasta aproximadamente la mitad de su volumen. Posteriormente, el molde fue sometido a una compactación ligera mediante volteo vertical repetido, con el fin de acomodar el material en su interior.

Una vez alcanzada una distribución homogénea, se colocó un disco de cartón sobre la superficie del agregado para marcar el nivel alcanzado. El material fue retirado del molde y posteriormente, el volumen correspondiente se determinó mediante el llenado con agua hasta la marca establecida, registrando la masa del sistema para su cálculo.

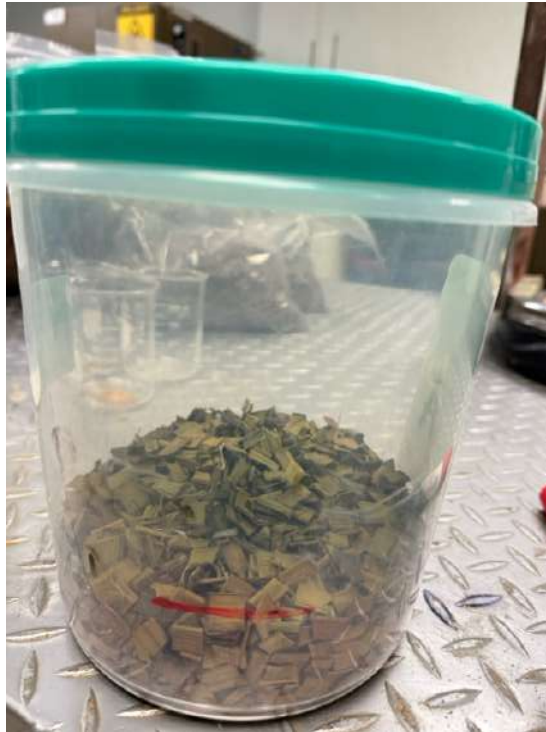


Figura 10. Molde usado para el cálculo de la densidad aparente.

3.3 Absorción de agua

La absorción de agua se define como la capacidad de un material para retener agua dentro de su estructura cuando entra en contacto con ella. Este parámetro se evaluó siguiendo las recomendaciones de RILEM TC 236-BBM [20], empleando una centrifuga (figura 11), con el fin de eliminar el exceso de agua retenida superficialmente debido a la naturaleza del bio-agregado.

El procedimiento inició con el secado de aproximadamente 200 g de yucca a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Posteriormente, se preparó una bolsa permeable con

perforaciones de 1mm, la cual fue previamente humedecida y acondicionada mediante centrifugado para eliminar el exceso de agua

A continuación, se colocaron 25 g de bio-agregado seco en la bolsa y se sometieron a inmersión en agua durante un tiempo determinado. Tras este periodo, la muestra fue centrifugada con el fin de remover el agua libre superficial, posteriormente se registró la masa correspondiente.

Este procedimiento se repitió utilizando la misma muestra para diferentes tiempos de inmersión (1 min, 15 min, 4 h, 24 h y 48 h), permitiendo evaluar la variación en la absorción de agua en función del tiempo.



Figura 11. Centrifuga con bolsa permeable e inmersión del bio-agregado.

3.4 Conductividad térmica

Para la determinación de la conductividad térmica del bio-agregado de yucca, se consideran las recomendaciones del RILEM, sin embargo, debido a las limitaciones del equipo y sensores disponibles, fue necesario realizar ajustes al procedimiento experimental.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un analizador de propiedades térmicas TEMPOS (Meter Environment), equipado con un sensor tipo KS-3, basado en el método de fuente de calor lineal transitoria. Este método cumple con los lineamientos establecidos en las normas IEEE 442-1981 y del ASTM D5334- 08 [39,40] (figura 12).

Previamente al ensayo, la muestra fue secada a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Posteriormente, el material se colocó en un recipiente plástico de al menos 50 mm de diámetro, asegurando su llenado completo para evitar vacíos. El sensor se insertó en la parte central del espécimen con el fin de obtener una medición representativa.

El ensayo se realizó a temperatura ambiente, estableciendo un ciclo de calentamiento y enfriamiento de 10 min. Finalmente, se registraron los valores de conductividad térmica obtenidos, con una precisión aproximada de $\pm 0.01 \text{ W/mk}$.



Figura 12. Equipo TEMPOS para medición de conductividad térmica.

3.5 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

La caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se llevó a cabo empleando un equipo Shimadzu modelo IRTracer-100. Las muestras, previamente secadas y acondicionadas en forma de polvo, fueron preparadas para su análisis espectroscópico.

Los espectros se obtuvieron en un intervalo de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, con una resolución: 4 cm^{-1} . En el caso del bio-agregado se realizaron 80 barridos, mientras que para la ceniza volante y el cemento Portland se efectuaron 64 barridos, con el objetivo de mejorar la relación señal-ruido [41]. Los espectros obtenidos permitieron identificar los grupos funcionales presentes en los materiales analizados.

3.6 Difracción de rayos X (DRX)

La caracterización mineralógica del cemento Portland, la ceniza volante y el bio-agregado se realizó mediante difracción de rayos X utilizando un difractómetro Panalytical modelo Empyrean, con radiación $\text{Cu K}\alpha_1$, $1.5406\text{\AA}$.

Previo al análisis, las muestras fueron trituradas y tamizadas hasta obtener un polvo fino, con el propósito de garantizar una adecuada homogeneidad. Las mediciones se efectuaron en un rango de 2θ entre 8° y 80° , con un tamaño de paso de 0.0508714° . [41]. Los difractogramas obtenidos se compararon con bases de datos cristalográficas para la identificación de las fases minerales presentes.

3.7 Termogravimetría (TGA)

El análisis termogravimétrico, se llevó a cabo utilizando un equipo PerkinEimer modelo STA6000. Para ello, se emplearon muestras previamente secadas y pulverizadas, asegurando condiciones homogéneas durante el ensayo.

Las pruebas se realizaron en un intervalo de temperatura de 20 a 800°C para el análisis de la yucca [41]. Durante el ensayo, se registró la variación de masa de la temperatura, lo que permitió evaluar los procesos de descomposición térmica y la estabilidad térmica del material.

Etapas 4. Tratamiento del bio-agregado

4.1 Preparación del material

Se cortaron hojas de yucca, después se cortaron en pedazos con tal de obtener una granulometría correcta, la cual resultó entre los 4 a 6 mm. Por consiguiente, se colocó el material en una charola para meterla al horno e iniciar el secado a una temperatura de 80°C durante 16 horas hasta tener una materia uniforme, lo que quiere decir es que sus componentes ya no sean visibles. Después de hacer esto, se procede a utilizar la materia (figura 13).



Figura 13. Preparación del material.

4.2 Tratamiento de hornificación

Este tratamiento consistió en sumergir las partículas de bio-agregado en agua destilada durante 3 horas (figura 14), esto para alcanzar la saturación necesaria. Después, el secado se inició en el horno a 80°C permaneciendo durante 16 horas. Esto se repitió ocho veces.

4.3 Análisis del tratamiento

Para este tratamiento, se necesitó ciertos análisis para tener en cuenta cuantos lavados son necesarios en el caso del bio-agregado yucca. Teniendo en cuenta lo que se quería obtener, se hicieron análisis con DRX para obtener el punto de estabilidad en la partícula, FTIR para observar los grupos funcionales y como estos cambian de acuerdo a los lavados, TGA para obtener un porcentaje de la pérdida de masa e igual la descomposición de la materia.



Figura 14. Inmersión en agua destilada por 3 horas.

Etapa 5. Diseño experimental de la mezcla

Para el desarrollo del diseño experimental se utilizó el software de Desing Expert, el cuál nos permitió generar una matriz experimental para evaluar la influencia del porcentaje de sustitución del bio-agregado en la mezcla utilizada para la fabricación de bloques.

A partir de este sftware se estableció un diseño estadístico de experimentos, mediante el cual se definieron las combinaciones de los factores y niveles de estudio. El programa generó las corridas experimentales necesarias, las cuales se presentan en la tabla 2, permitiendo evaluar distintas proporciones de sustitución del agregado convencional por bio-agregado.

Este procedimiento facilitó la optimización de la mezcla, ya que permitió identificar las combinaciones de materiales más adecuadas para la fabricación de los bloques, las cuales fueron posteriormente analizadas mediante las pruebas físicas, mecánicas y térmicas correspondientes.

Tabla 2. Diseño de experimentos

	Std	Run	Factor 1 A:BIOAGREGADO %	Factor 2 B:CENIZA VOLANTE %	Factor 3 C:AGUA/CEMENTO	Factor 4 D:ADITIVO %	Response 1 RESISTIVIDAD TERMICA mK/W	Response 2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPa
	5	1	25	10	0.5	0.02	0.7644	1.14
	4	2	40	15	0.45	0	1.728	0.91
	6	3	40	10	0.5	0	1.727	1.15
	3	4	25	15	0.45	0.02	0.8123	4.28
	7	5	25	15	0.5	0	1.399	1.86
	1	6	25	10	0.45	0	1.3981	1.68
	2	7	40	10	0.45	0.02	1.1846	1.85
	8	8	40	15	0.5	0.02	1.021	1.72

Etapa 6. Fabricación del bloque y especímenes.

En está etapa se empezó a fabricar los especímenes en este caso de bloques con bio-agregado y cubos, en el cuál primero se emplea la dosificación de mezcla para mortero en el que tenemos la siguiente tabla 3 y 4:

Tabla 3. Dosificación del mortero vegetal para un bloque

Bio-agregado (g)	Cemento Portland (g)	Arena (g)	CV (g)	Agua Mezcla (g)	Aditivo (g)
312	1080	9795	172.8	1069	12

Una vez definida la dosificación, los materiales fueron mezclados hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, la mezcla se colocó en un molde metálico hueco de dimensiones 14 x 20 x 40 cm, correspondientes a un bloque de mampostería.

El proceso de compactación se realizó mediante vibrocompresión, con el fin de mejorar la distribución de los materiales dentro del molde y reducir la presencia de vacíos. La mezcla utilizada presentó un revenimiento igual a 0, característico de los sistemas de vibrocompactación utilizados en la fabricación de bloques.

Después del llenado del molde, la mezcla se dejó reposar durante aproximadamente 1 minutos, con el objetivo de permitir una ligera estabilización del material antes de desmolde. Posteriormente, se retiró el molde para obtener el bloque conformado.

Una vez desmoldados, los bloques fueron colocados en un cuarto de curado durante un periodo de 28 días, con el propósito de permitir el adecuado desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento y asegurar el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Durante este periodo, las muestras se mantuvieron en condiciones controladas de humedad y temperatura, evitando la pérdida prematura de agua necesaria para el proceso de hidratación.

Tabla 4. Dosificación para 3 cubos

Bio-agregado (g)	Cemento Portland (g)	Arena (g)	CV (g)	Agua Mezcla (g)	Aditivo (g)
19.5	67.5	612.2	10.8	66.9	0.8

Para la elaboración de los especímenes destinados a los ensayos de resistencia a compresión, se emplearon moldes cúbicos con dimensiones de 5 x 5 x 5 cm. Se definió la preparación de cuatro especímenes por cada edad de ensayo, obteniendo un total de 12 cubos.

El proceso de llenado se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM-C109 [35], asegurando que la colocación de la mezcla en los moldes se completara en un tiempo máximo de 2 minutos y 30 segundos después del mezclado. La mezcla se introdujo en dos capas aproximadamente iguales, garantizando una adecuada distribución dentro del molde.

Cada capa fue compactada mediante un proceso de apisonado uniforme, con múltiples golpes distribuidos en varias rondas, con el fin de eliminar vacíos y mejorar la homogeneidad del material. Posteriormente, se realizó un acabado superficial ligero para nivelar la superficie de los especímenes.

Finalmente, los cubos fueron sometidos a un proceso de curado durante 28 días en una cámara controlada, manteniendo una humedad relativa cercana al 90% y una temperatura de 27° C, previo a la realización de los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión.

Etapas 7- Exposición a ambientes de deterioro.

7.1 Intemperie

El ensayo de exposición a la intemperie tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de los bloques al ser sometidos a condiciones ambientales reales durante periodos prolongados. Para ello, las muestras fueron expuestas directamente a la intemperie por intervalos de 3 y 6 meses, permitiendo analizar su interacción con factores climáticos naturales.

Durante este periodo, los bloques estuvieron en contacto con variaciones de temperatura, tanto bajas como elevadas, así como con cambios de humedad propios del entorno. Esta prueba permitió identificar las modificaciones físicas y mecánicas que presentan los bloques como resultado de su exposición continua a condiciones ambientales reales, contribuyendo a la evaluación de su desempeño y durabilidad como material de construcción.



Figura 15. Bloques expuestos a la intemperie.

7.2 Humedad

El ensayo de humectación y secado tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de los bloques al ser sometidos a condiciones cíclicas de humedad, considerando que este tipo de material puede estar expuesto al contacto directo con agua o ambientes húmedos durante su vida útil. Este

procedimiento permite inducir un estado de estrés físico en el material, con la finalidad de analizar los cambios en sus propiedades posteriores al ensayo.

El procedimiento consistió en someter los bloques a un total de 17 ciclos de humectación y secado. Cada ciclo estuvo compuesto por un día de humectación, seguido de tres días de secado a una temperatura controlada de 21 °C [15]. Al finalizar los ciclos establecidos, las muestras fueron acondicionadas y posteriormente evaluadas para determinar el efecto de este tipo de deterioro acelerado sobre sus propiedades físicas y mecánicas.



Figura 16. Bloques bajo prueba de humedad.

7.3 Cámara de rayos QUV

El ensayo de intemperismo tuvo como objetivo comparar el comportamiento del material compuesto con bio-agregado bajo condiciones de intemperismo natural

y de intemperismo acelerado, con el fin de evaluar su durabilidad frente a distintos mecanismos de deterioro ambiental.

Para el intemperismo acelerado, se empleó una cámara de envejecimiento por radiación ultravioleta (Q-Lab), en la cual se expusieron especímenes circulares (figura 17), fabricados con la misma dosificación que los bloques. La exposición controlada a radiación UV, temperatura y humedad permitió simular, en un periodo reducido de tiempo, los efectos de la radiación solar y la humedad presentes en ambientes reales.

El ensayo se realizó conforme a la norma ASTM G154: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Materials [42] mediante la aplicación de ciclos alternados de radiación UV y condensación, siguiendo un esquema de 8 horas de exposición a radiación UV, a una temperatura controlada, seguidas de 4 horas de condensación, con el fin de reproducir condiciones equivalentes a periodos de día y noche con presencia de humedad. Este ciclo completo tuvo una duración de 12 horas.

Las muestras fueron sometidas a un total de 20 ciclos, correspondientes a 240 horas de exposición acelerada, seleccionadas para evaluar la respuesta inicial y progresiva del material frente al intemperismo, sin inducir una degradación extrema. Durante el ensayo, las muestras se colocaron de manera que todas recibieran una exposición uniforme a la radiación y a la humedad.

Finalizado el periodo de envejecimiento acelerado, los especímenes fueron retirados de la cámara y acondicionados a temperatura ambiente, para posteriormente ser evaluados mediante ensayos químicos, permitiendo analizar el efecto del envejecimiento UV sobre el desempeño del material.

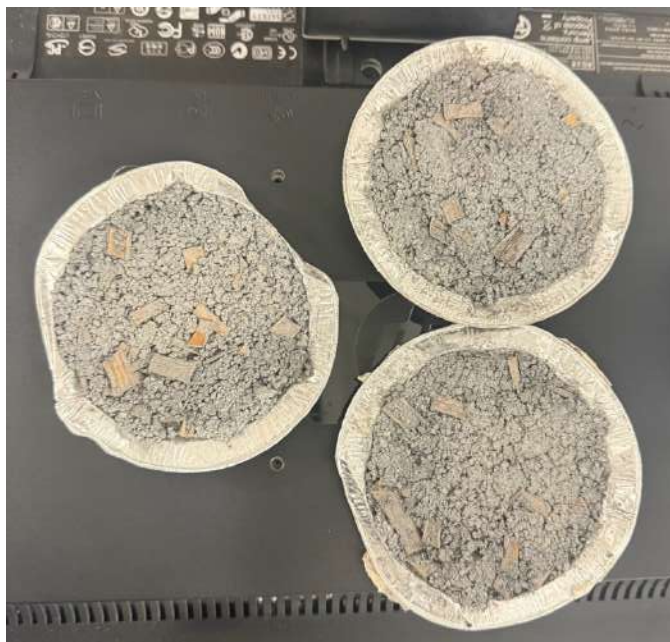


Figura 17. Especímenes usados para la Cámara de UV.

7.4 Control

Con el propósito de contar con un punto de referencia para la comparación de resultados, se elaboraron tres bloques de control, los cuales no fueron sometidos a ningún tipo de ambiente de deterioro. Estas muestras se conservaron bajo condiciones normales de laboratorio y se utilizaron como referencia para evaluar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los bloques expuestos a los distintos ensayos de durabilidad.

Los bloques de control se compararon con los especímenes sometidos a pruebas de intemperismo durante periodos de 3 y 6 meses, así como con aquellos expuestos a ciclos de humectación y secado. Esta comparación permitió analizar el efecto de los diferentes ambientes de deterioro sobre el comportamiento del material a lo largo del tiempo.

Etapas 8- Condiciones ambientales durante el periodo de exposición

Durante el periodo de exposición a intemperie, se realizó el monitoreo de las condiciones ambientales mediante una estación meteorológica, con el fin de

registrar las variables climáticas presentes durante el ensayo. Los datos obtenidos fueron recopilados y visualizados mediante la plataforma digital Ambient Weather Network, a través de su panel de monitoreo en línea. Esta plataforma permitió registrar y analizar parámetros como temperatura ambiental, humedad relativa y otras variables meteorológicas durante el periodo de exposición de los especímenes. Los registros obtenidos se utilizaron para caracterizar las condiciones ambientales a las que estuvieron sometidos los bloques durante el ensayo de intemperismo.

Etapas 9- Evaluación del comportamiento térmico

9.1 HotBox

El comportamiento térmico de los bloques con bio-agregado fue evaluado mediante el ensayo de HotBox (figura 18), con el objetivo de determinar su coeficiente de transmisión térmica (U). Para este ensayo, los bloques fueron colocados entre una cámara caliente y una cámara fría, generando un gradiente de temperatura controlado a través del material.

Las muestras permanecieron dentro del equipo hasta alcanzar condiciones térmicas estables, considerando este estado cuando las temperaturas en ambas caras del bloque y el flujo de calor se mantuvieron prácticamente constantes durante un intervalo de tiempo. Una vez alcanzado este equilibrio, se registraron los parámetros necesarios para la determinación del coeficiente de transmisión térmica, de acuerdo con la norma ASTM C1363 [36].

El coeficiente U se determinó a partir de la relación entre el flujo de calor que atraviesa el material y la diferencia de temperatura entre sus caras. Posteriormente, los resultados fueron contrastados con los de un bloque de referencia, con el objetivo de evaluar la influencia del bio-agregado con el comportamiento térmico del sistema.



Figura 18. Esquema experimental para la medición de propiedades térmicas (HotBox).

Etapa 10- Análisis posterior al envejecimiento.

Una vez concluido el periodo de exposición de los bloques a distintos ambientes de deterioro, se evaluaron las propiedades del material con el propósito de identificar los cambios asociados a los procesos de envejecimiento. Para ello, se realizaron ensayos de resistencia a compresión, así como análisis mediante difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja por transformada de fourier.

El ensayo de resistencia a compresión se llevó a cabo en los especímenes después del periodo de exposición, con el fin de analizar posibles variaciones en su comportamiento mecánico en comparación con las muestras de referencia. De esta manera, se pudo identificar la influencia de los diferentes ambientes de deterioro sobre el desempeño estructural del material.

Asimismo, se efectuaron análisis FTIR para examinar posibles modificaciones en los grupos funcionales del bio-agregado y en los compuestos presentes dentro de la matriz cementante. Esto permitió identificar cambios químicos asociados al envejecimiento del material.

De manera complementaria, se realizaron estudios de difracción de rayos X con el objetivo de analizar la evolución de las fases minerales tras la exposición a diferentes condiciones. Los difractogramas obtenidos se contrastaron con los resultados iniciales, permitiendo evaluar las transformaciones mineralógicas del sistema cementante.

Capítulo 3- Análisis y discusión de los resultados

3.1 Caracterización del Cemento Portland

Con el fin de conocer las propiedades del material cementante utilizado, se realizó la caracterización del cemento portland mediante FTIR y DRX. Estos análisis nos permiten identificar las fases y componentes característicos del cemento.

3.1.2 Distribución de tamaño de partículas del cemento Portland

La figura 19, muestra la distribución del tamaño de partícula del cemento Portland utilizado en esta investigación, determinada mediante análisis granulométrico por difracción láser.

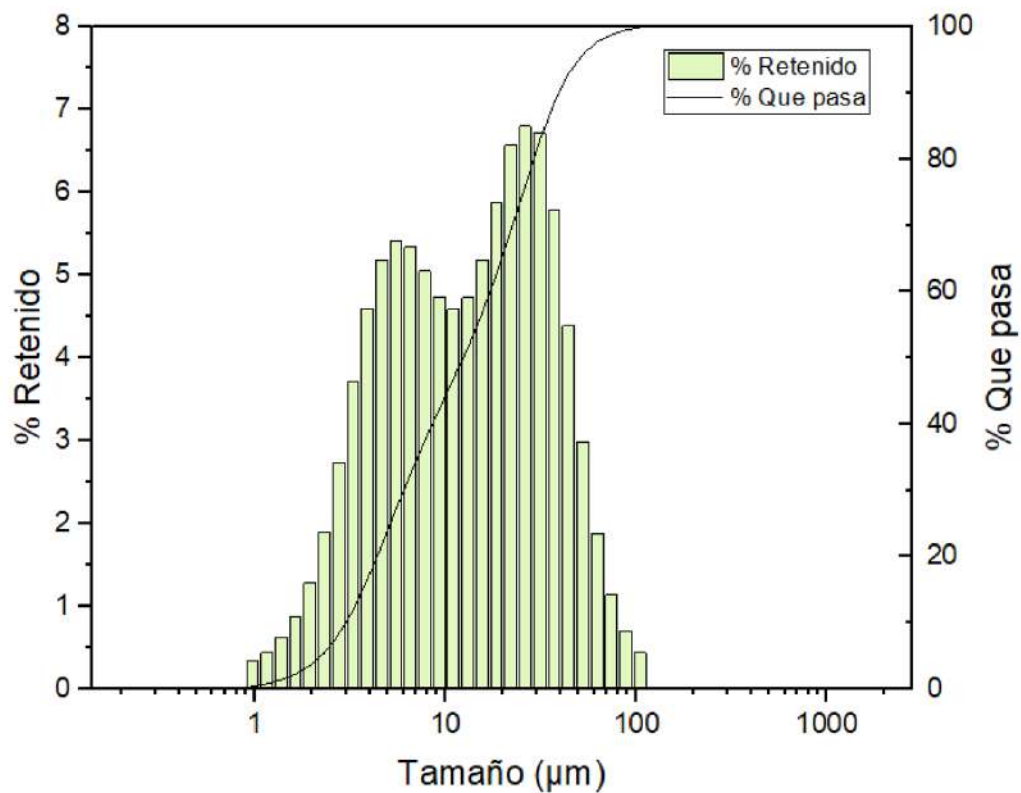


Figura 19. Distribución del tamaño de partículas del cemento Portland.

La figura 19, muestra la distribución del tamaño de partícula del cemento Portland utilizado. Se observa una distribución granulométrica característica de cemento Portland comercial, con un predominio de partículas en el rango micrométrico. A partir del análisis, se obtuvieron valores aproximados de $D_{10}= 3\ \mu\text{m}$, $D_{50}= 17\ \mu\text{m}$ y $D_{90}= 49\ \mu\text{m}$, lo que indica que el 50% de las partículas presentan tamaños inferiores aproximadamente $17\ \mu\text{m}$.

Estos resultados evidencian que el cemento presenta una finura adecuada, lo cual es un factor clave en los procesos de hidratación del material. En general, la distribución se encuentra dentro de los rangos típicos reportados para cementos Portland comerciales [44].

3.1.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

En la figura 20, se muestra el resultado del análisis por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier del Cemento Portland, en donde se analizaron los grupos funcionales característicos del material.

El espectro del FTIR del cemento Portland anhidro muestra bandas características de las fases del Clinker. La señal $918\ \text{cm}^{-1}$ se asocia al estiramiento asimétrico Si-O de la alita (C_3S) [34], mientras que la señal en $520\ \text{cm}^{-1}$ corresponde a vibraciones de flexión $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ propias de silicatos cálcicos [45]. Las bandas de $1410\ \text{cm}^{-1}$ y $870\ \text{cm}^{-1}$, son atribuibles a vibraciones del grupo carbonato (CO_3^{2-}), las cuales son típicas de procesos de carbonatación superficial [46]. La banda alrededor de 1130 se asocia a vibraciones de sulfatos provenientes del yeso que se añade durante la molienda del cemento [47].

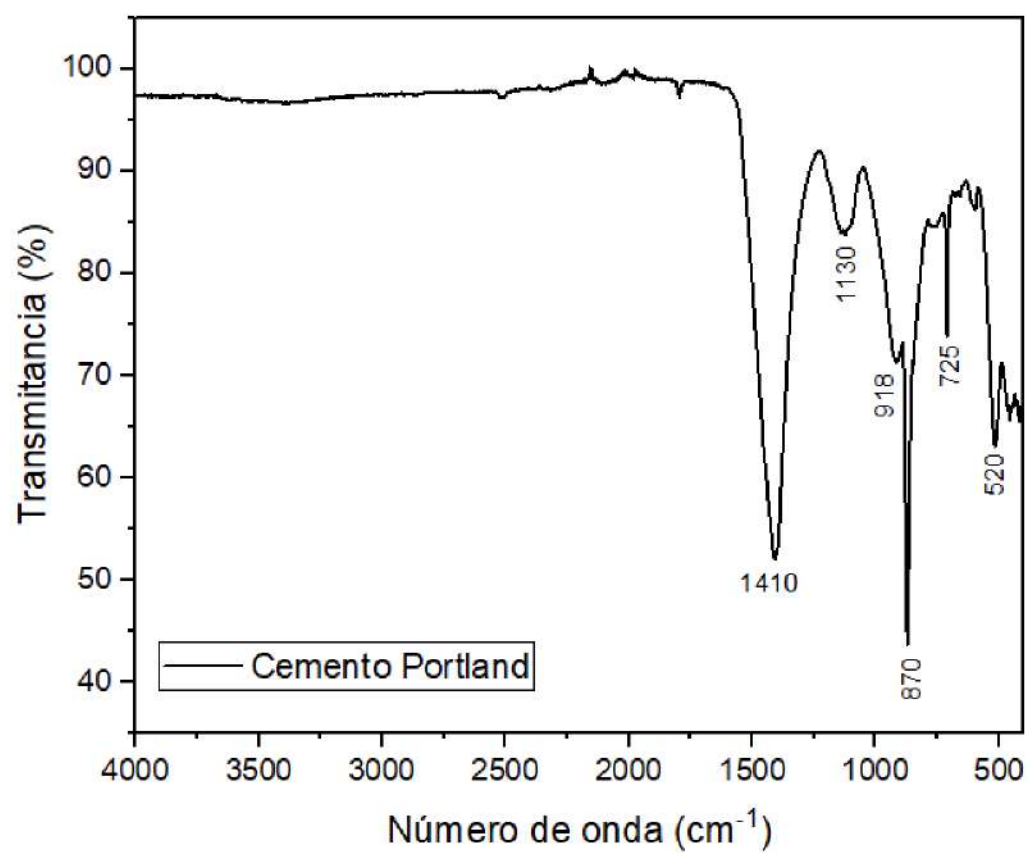


Figura 20. FTIR del cemento Portland utilizado en la investigación.

3.1.3 Difracción de Rayos X

En la figura 21, se muestra el resultado del análisis por Difracción de Rayos X del Cemento Portland.

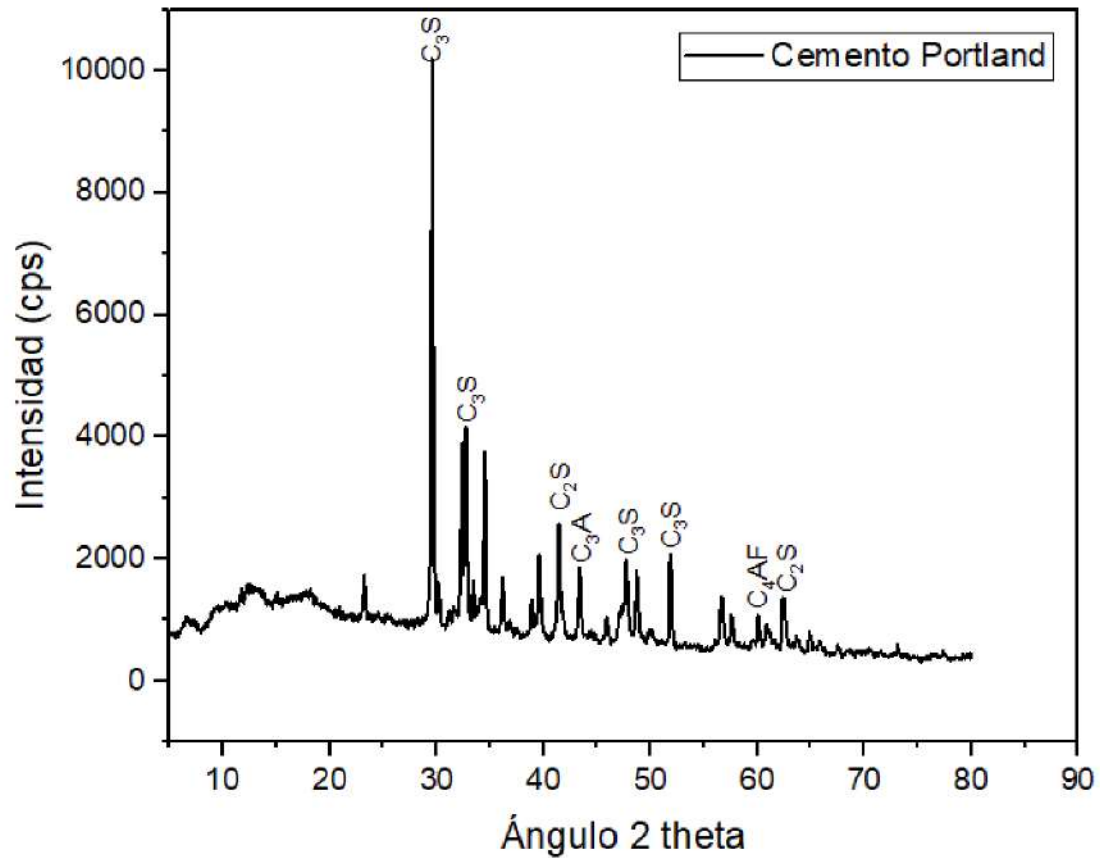


Figura 21. DRX del cemento Portland.

El difractograma del Cemento Portland mostró las fases cristalinas típicas del clinker [48]. La fase predominante identificada fue la Alita (C_3S), evidenciada por los picos en 32.7° y 34.26° 2θ . Asimismo, se identificó la presencia de Belita (C_2S) predominante en los picos 41.43° y 60.50° 2θ . Adicionalmente, se observaron señales correspondientes a Aluminato tricálcico (C_3A) y Ferrito tetracálcico (C_4AF), principalmente en la región 43° 2θ [49].

3.2 Caracterización de la Ceniza Volante

Con el propósito de conocer las propiedades de la ceniza volante, se realizó la caracterización mediante distribución del tamaño de partículas, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier y por difracción de rayos X.

3.2.1 Distribución de tamaño de partículas de la ceniza volante

La figura 22, muestra la distribución del tamaño de partícula de la ceniza volante utilizada en esta investigación, determinada mediante análisis granulométrico por difracción láser.

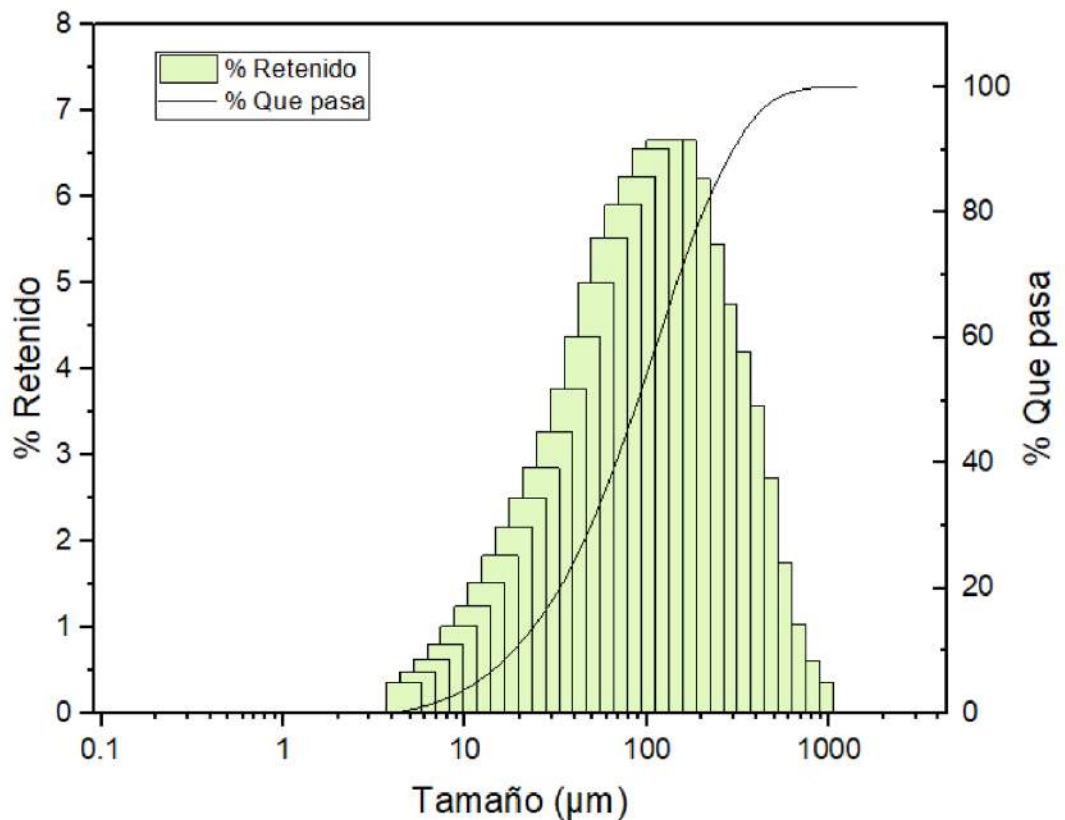


Figura 22. Distribución del tamaño de partículas de la ceniza volante.

La figura 22 presenta la distribución de la ceniza volante. Se observa una distribución más amplia en comparación con el cemento Portland, con una mayor

presencia de partículas en rangos de tamaño medio y grueso. A partir del análisis granulométrico se obtuvieron valores aproximados de $D_{10}= 33\ \mu\text{m}$, $D_{50}= 89\ \mu\text{m}$ y $D_{90}= 296\ \mu\text{m}$, lo que indica que el 50% de las partículas presentan tamaños inferiores aproximadamente a $89\ \mu\text{m}$.

La mayor dimensión promedio de las partículas en comparación con el cemento portland es consistente con lo reportado en la literatura para este tipo de material, ya que las cenizas volantes suelen presentar partículas esféricas de mayor tamaño generadas durante los procesos de combustión del carbón[50].

3.2.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

En la figura 23, se obtiene el espectro FTIR de la ceniza volante Clase F, se muestra una banda intensa alrededor de $1060\ \text{cm}^{-1}$ atribuible al estiramiento

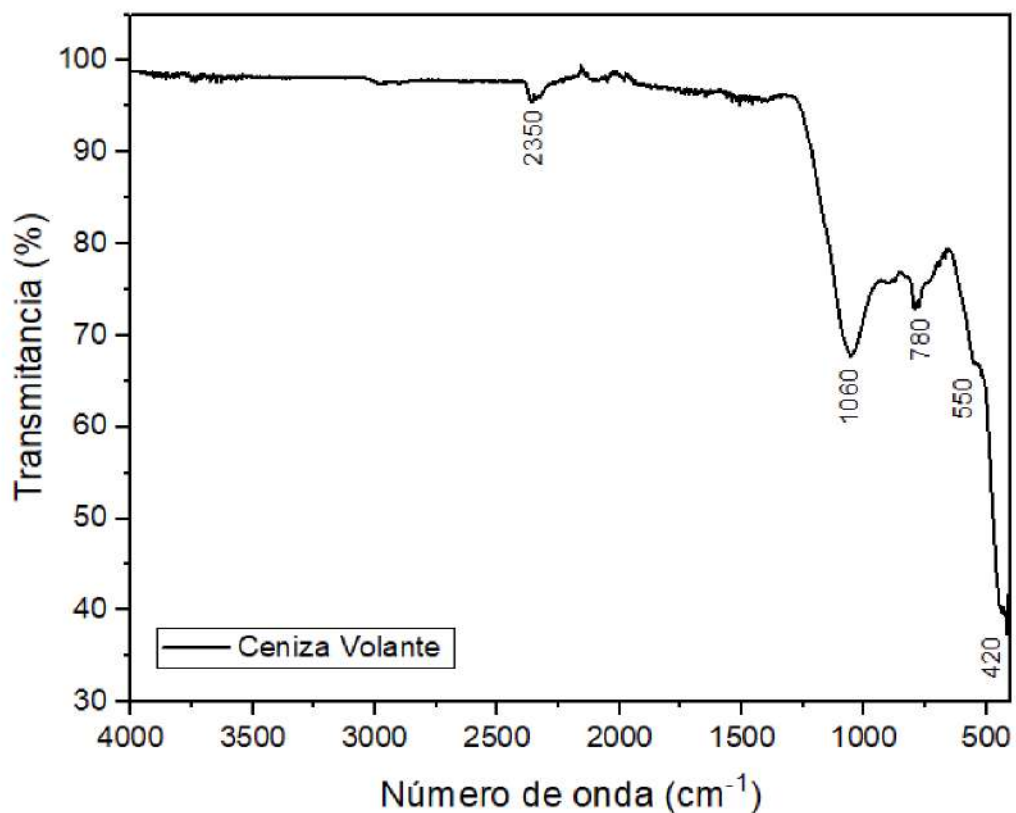


Figura 23. FTIR de la ceniza volante.

asimétrico Si-O-Si/ Si-O-Al, la cual es característica de la fase aluminosilicáta. Las bandas en 780, 550 y 420 cm^{-1} corresponden a vibraciones de estructuras silíceas y aluminosilicáticas confirmando así la naturaleza puzolánica del material [51].

3.2.3 Difracción de Rayos X

En la figura 24, se tiene el análisis por Difracción de Rayos X de la ceniza volante.

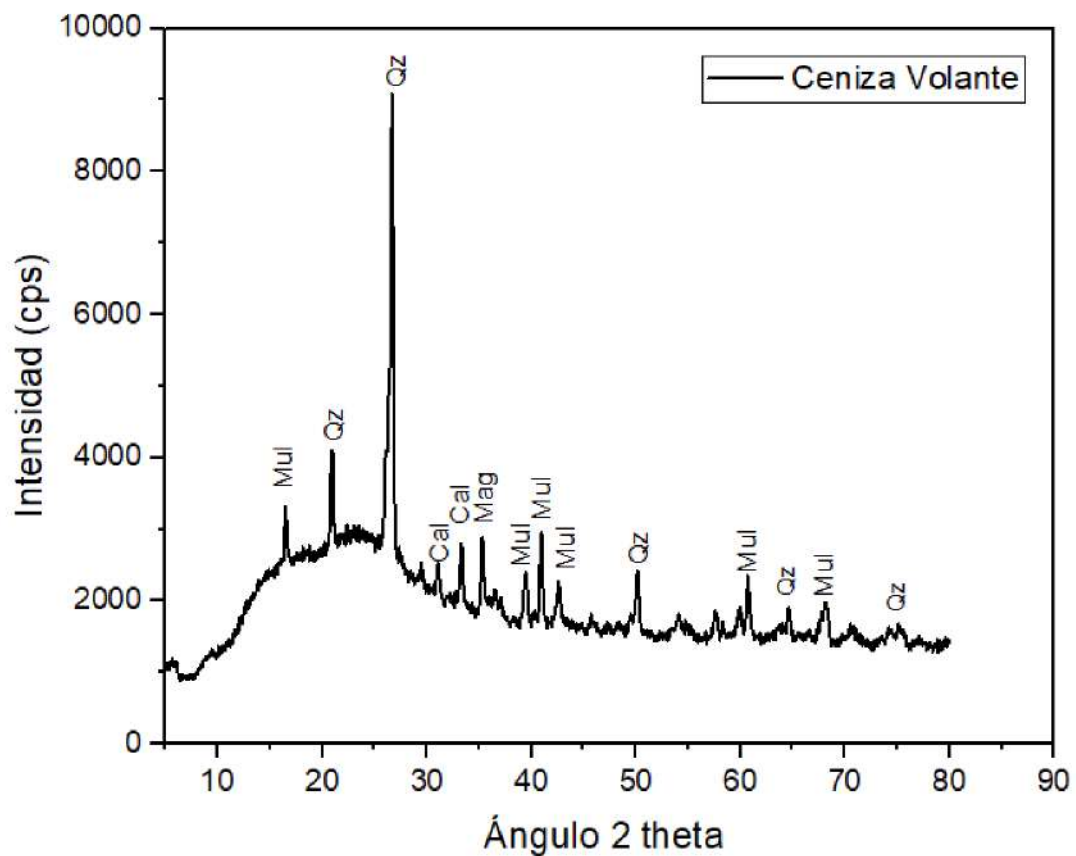


Figura 24. DRX de la ceniza volante.

El difractograma de la ceniza volante mostró una banda amorfa entre 20° y 35° 2θ [54], característico de fases vítreas aluminosilicáticas [52]. Se identificó como fase cristalina el Cuarzo, evidenciado por su pico de gran intensidad cercano a

26°. Asimismo, se detectó la presencia de Mullita mediante bandas en las regiones de 16°, 41° y 60°. Por último, se observaron picos bajos alrededor de 29°, atribuible a la Calcita.

3.3 Caracterización biológica de la yucca sin tratamiento

En la siguiente tabla 5, podemos observar los resultados correspondientes a la caracterización biológica de la yucca, también tenemos la caracterización del agave salmiana ya reportado [4,5] para tener una comparativa de los análisis.

Tabla 5.Resultados de la caracterización del bio-agregado

	Agave Salmiana	Yucca Carnerosana
Prueba	Resultado %	Resultado %
Húmedad	5.2	31.99
Cenizas	15.76	17.21
Extraíbles con etanol-tolueno	23.46	2.48
Lignina insoluble en ácido sulfúrico	10.60	36.36
Holocelulosa	42.64	47.55
α - celulosa	49.63	42.89
Hemicelulosa	50.36	4.66

Los resultados de caracterización biológica muestran que la yucca esta constituida principalmente por celulosa, con un valor promedio de 42% comparable al reportado para el agave [4,5]. Asimismo, se determinaron el contenido de lignina y hemicelulosa, componentes que han sido ampliamente asociados a la rigidez, estabilidad y comportamiento mecánico de las fibras lignocelulósicas, influyendo en su desempeño como bio-agregado en materiales cementicios [53]. Por otro lado, el alto contenido de compuestos polares que fueron extraídos con la solución de etanol-tolueno fue de 2.48%, lo cual sugiere la presencia de ceras, extractivos y azúcares. Se consideró que la presencia de

estos compuestos pueden interaccionar con el agua de fraguado e interferir con la estructura de la matriz cementante [54]. En este sentido, se considera necesario aplicar un tratamiento al material vegetal con el fin de reducir dichos compuestos y mejorar la compatibilidad entre el bio-agregado y la matriz cementicia.

A partir de los resultados de las normativas TAPPI [34], las cuales permitieron establecer la composición biológica del bio-agregado, se procede al análisis de los resultados correspondientes a la caracterización por recomendaciones RILEM [20]. Esta caracterización complementa la información previamente obtenida, incorporando ahora un enfoque orientado al comportamiento físico del bio-agregado. Los parámetros evaluados mediante las recomendaciones RILEM influyen de manera directa en la definición y ajuste del diseño de mezcla.

3.4 Caracterización fisicoquímica del bio-agregado sin tratamiento y post tratamiento

Con el objetivo de evaluar las propiedades del bio-agregado, se realizó su caracterización fisicoquímica antes y después del tratamiento aplicado. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

3.4.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier sin tratamiento

Como se observa en la figura 25, el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, permitió confirmar la presencia de los principales grupos funcionales característicos de la materia vegetal de acuerdo con lo reportado en la literatura [41]. Se identifica un pico amplio en el rango 3300 cm^{-1} asociado a la vibración de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H), el cual es típico de compuestos con celulosa, hemicelulosa y lignina, y está relacionado con la presencia de enlaces de hidrógeno y contenido de humedad en el material. Asimismo, la señal detectada alrededor de 2985 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de estiramientos de los grupos metil y metileno ($-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$).

considerados característicos de biomasa lignocelulósica. Las bandas registradas en el intervalo de 1727 cm^{-1} hasta 1418 cm^{-1} se asocian con vibraciones de estiramiento y flexión de distintos grupos funcionales presentes en los carbohidratos, principalmente relacionados con enlaces C=O, C-O y C-H. Finalmente, se observa una banda alrededor de 1030 cm^{-1} , correspondiente a los enlaces β -1,4-glicosídicos que unen las unidades de glucosa en celulosa y

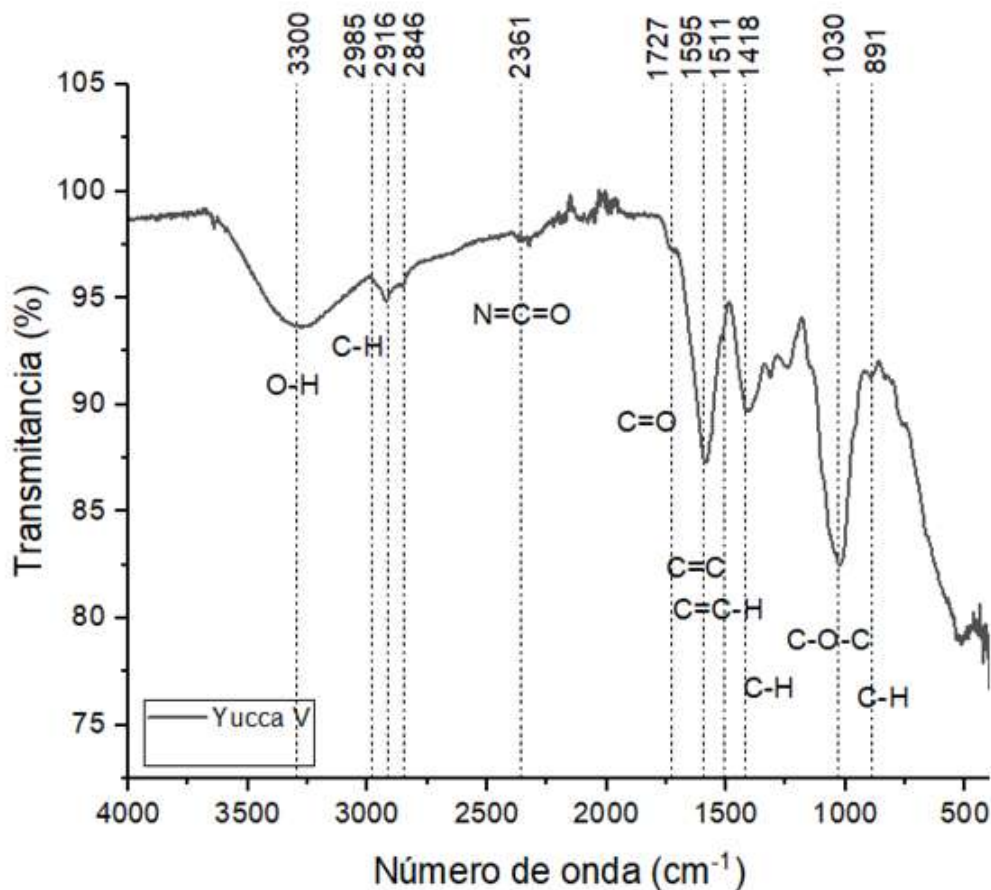


Figura 25. FTIR del bio-agregado sin tratamiento.

hemicelulosa [4,5,41].

3.4.2 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier post tratamiento

En la figura 26, se muestra los resultados del análisis por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier del material, con el fin de evaluar el efecto

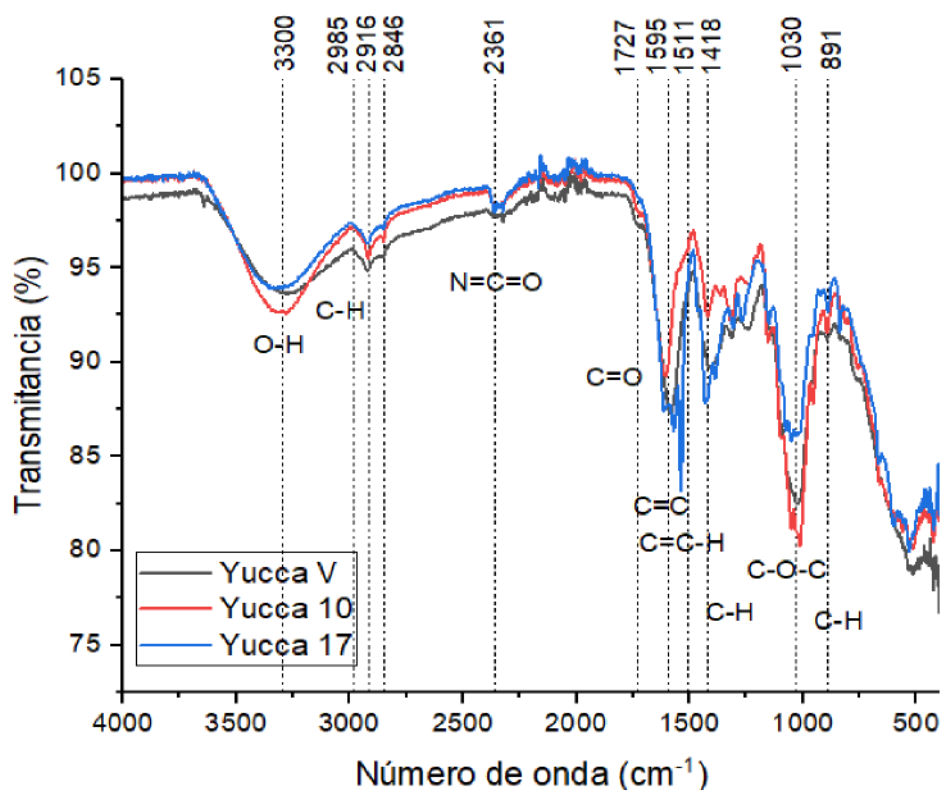


Figura 26. FTIR del bio-agregado post tratamiento.

del número de lavados sobre la estabilidad química del bio-agregado, analizando la evolución o cambio de los grupos funcionales característicos del material a lo largo de los ciclos.

Como se observa en la figura 26, el material fue sometido a un total de 17 ciclos de lavado con el objetivo de analizar su comportamiento químico. A partir de los espectros obtenidos, se identificó que en el lavado 17 el material presenta una disminución en la intensidad y definición de algunas bandas características en comparación con el lavado 10, lo cual sugiere una alteración en la estructura química del bio-agregado. Este comportamiento indica que, a un mayor número de lavados, ciertos componentes del material tienden a degradarse o bien a perder estabilidad, principalmente aquellos asociados a grupos funcionales polares. La reducción en la intensidad de la banda asociada a los grupos hidroxilo

(-OH) indica una posible ruptura de los puentes de hidrógeno, los cuales son fundamentales para la organización estructural de la celulosa. Esta observación es consistente con los resultados obtenidos mediante Difracción de rayos X mencionado más adelante, donde hace evidencia una variación en el índice de cristalinidad, indicando que un exceso de lavados puede afectar la organización de las regiones cristalinas de la celulosa.

Por otro lado, el lavado 10 mostró un comportamiento químico más estable, conservando de manera más definida las bandas asociadas a los grupos -OH ya los enlaces característicos de la celulosa, lo cual coincide con un índice de cristalinidad más estable.

3.4.3 Difracción de Rayos X sin tratamiento

En la figura 27, se puede observar la gráfica de la prueba de DRX para la yucca sin tratamiento.

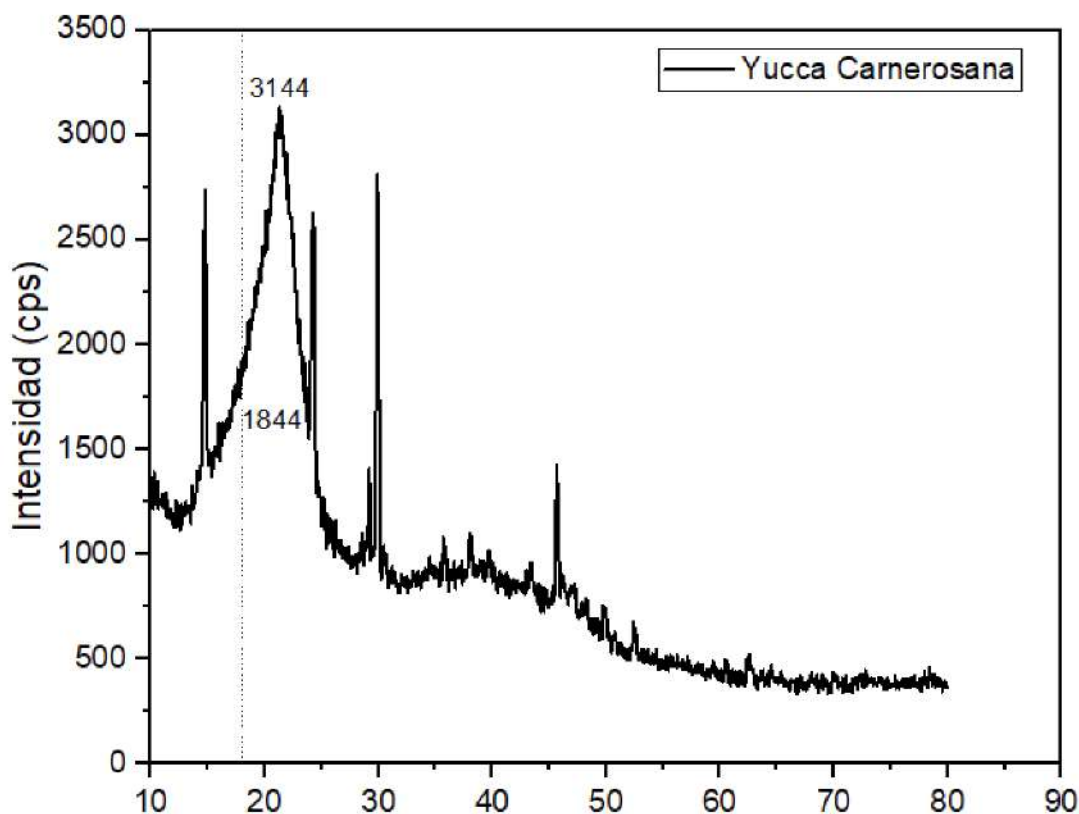


Figura 27. DRX del bio-agregado sin tratamiento.

De acuerdo con la literatura [55], para determinar el índice de cristalinidad de la yucca virgen se definió la siguiente ecuación=

$$IC (\%) = ((I_t - I_a)/I_t) \times 100 \quad \textbf{Ecuación 11}$$

Donde:

IC = Índice de Cristalinidad

I_t = es intensidad máxima del pico cristalino

I_a =representa la intensidad asociada a la región amorfa.

Se empleo el método de Segal [55] para calcular el índice de cristalinidad del material a partir de estos datos obtenidos mediante el análisis. En esta ecuación, I_t corresponde a la intensidad máxima del pico cristalino, que en este caso se registró con valor de 3114 u.a., mientras que I_a representa la intensidad asociada a la región amorfa, medida a un ángulo $2\theta = 18^\circ$ equivalente a 1844 u.a.. A partir de estos parámetros se obtuvo un índice de cristalinidad de 40.78 %, valor que es consistente con lo reportado en la literatura para materiales vegetales sin tratamiento [4-5]. Este resultado indica que el material presenta una proporción significativa de fases amorfas, lo cual es característico en fibras vegetales compuestas principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina.

3.4.4 Difracción de Rayos X post tratamiento

En la figura 28, se muestra los resultados del análisis por Difracción de Rayos X del material, con el fin de evaluar el efecto del número de lavados sobre la estabilidad química del bio-agregado, analizando la evolución o cambio de los grupos funcionales característicos del material a lo largo de los ciclos.

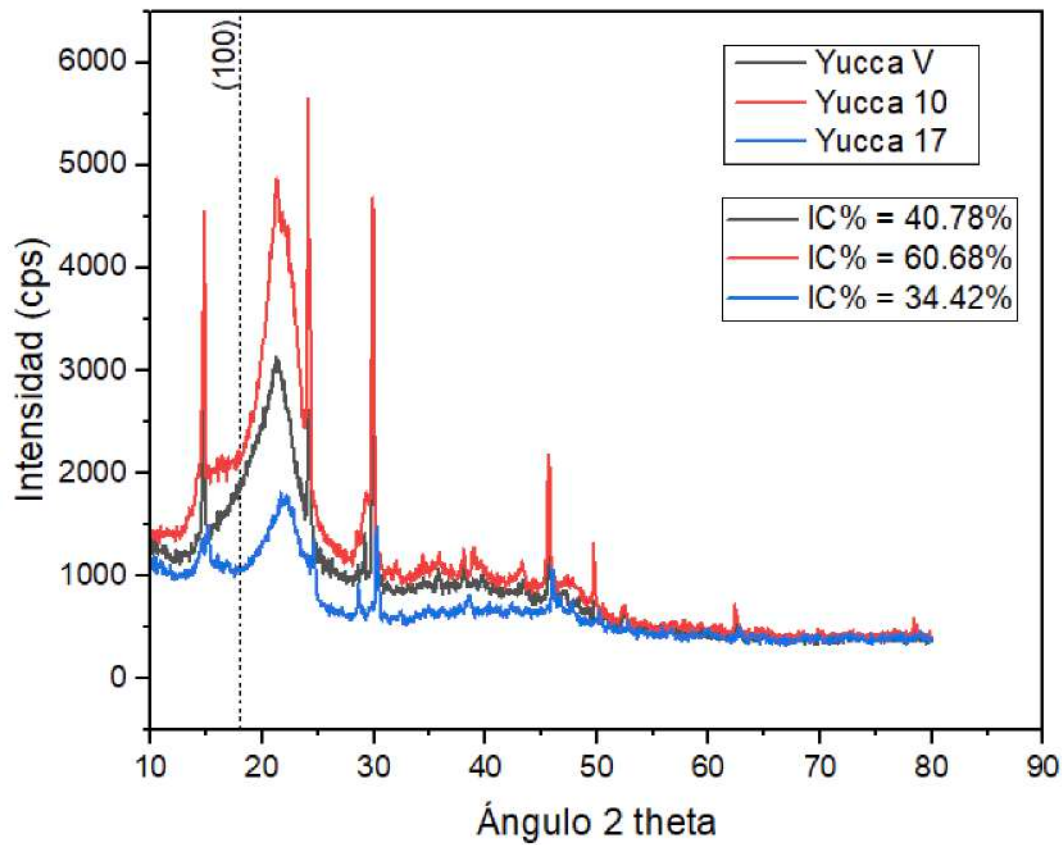


Figura 28. DRX del bio-agregado post tratamiento.

En la figura 28, se observa un comportamiento diferenciado en la organización estructural del bio-agregado en función del número de ciclos de lavado. El lavado número 17 evidencia una disminución en la definición e intensidad de los picos característicos, lo que indica una reducción en el grado de ordenamiento cristalino del material. Esta pérdida de cristalinidad sugiere una afectación en las regiones semicristalinas de la celulosa, asociada a procesos de degradación estructural por la exposición prolongada de lavados.

Por otro lado, el lavado número 10, obtuvo unos picos de difracción mas pronunciados y de mayor intensidad, obteniendo un índice de cristalinidad del 60.68%. Este valor representa un incremento significativo en comparación con la yucca virgen, la cual presentaba un 40% de cristalinidad. El aumento observado se asocia a la eliminación progresiva de componentes amorfos, como lo es la

hemicelulosa y la lignina, durante los primeros ciclos de lavado, favoreciendo una mayor proporción de regiones cristalinas de la celulosa, lo cual nos da un rango más estable, indicando una estructura más ordenada. Desde un punto microestructural, este comportamiento puede explicarse por la reorganización de las cadenas de celulosa, donde la reducción de grupos amorfos permite un mayor empaquetamiento y por ende una mejor alineación de las microfibrillas, reforzadas por la formación de puentes de hidrógeno [56]. Sin embargo, al incrementar el número de ciclos, el tratamiento provoca una ruptura parcial de enlaces glucosídicos β -1,4 y la alteración cristalina, generando una pérdida del orden estructural [57]. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos por FTIR, donde se observó una disminución en la intensidad de las bandas asociadas a los grupos hidroxilo en altos números de lavados.

3.4.5 Análisis Termo gravimétrico sin tratamiento

La figura 29 muestra los resultados del análisis termo gravimétrico del material, el cual permite evaluar su estabilidad térmica y los procesos de degradación asociados a la pérdida de masa en función de la temperatura.

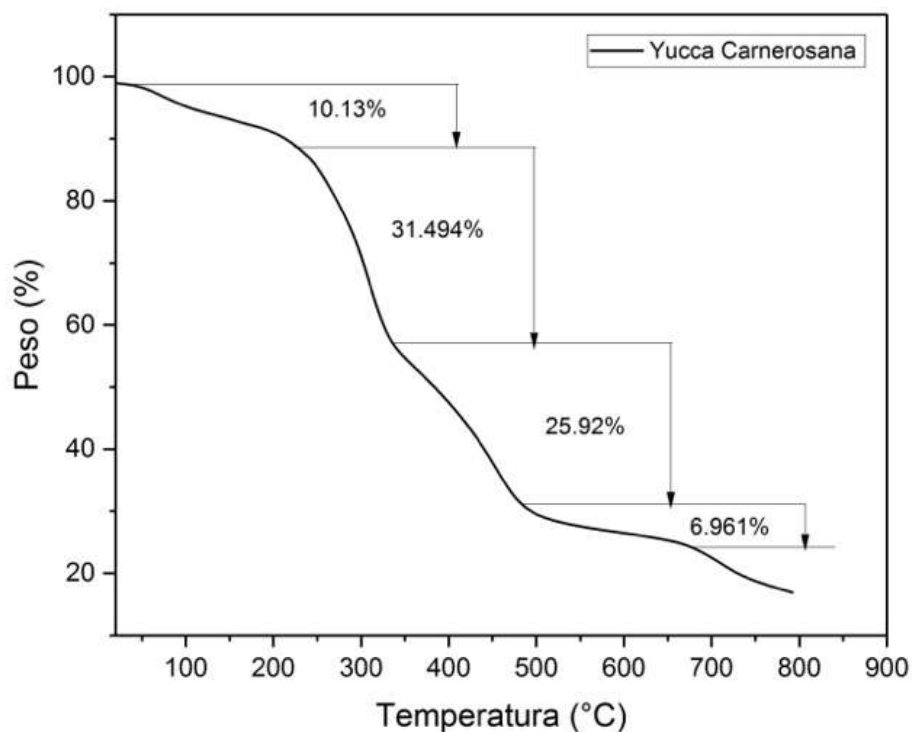


Figura 29. TGA del bio-agregado sin tratamiento.

Como se observa en la figura 29, la primera etapa de pérdida de masa ocurre en el rango de 20 a 115°C, con una disminución aproximada del 10.13%, la cual se asocia con la liberación de líquidos y sustancias volátiles presentes en el material. Al incrementarse la temperatura, se presenta una segunda etapa de pérdida de masa aun más significativa entre 125 y 800°C, correspondiente a un 57.414%, atribuida a la descomposición térmica de los componentes orgánicos del bio-agregado. Durante este intervalo, los elementos estructurales de la biomasa se degradan en distintos rangos de temperatura, por ejemplo la celulosa comienza

su descomposición a partir de aproximadamente 270°C, mientras que la lignina presenta una degradación en un rango más amplio entre 270 y 380°C [57]. En conjunto, la combustión de los compuestos orgánicos representan una pérdida de masa aproximada del 31.494%.

Finalmente, al concluir el ensayo, se obtiene un contenido de cenizas del 6.961%, lo cual corresponde a la fracción inorgánica del material.

3.4.6 Análisis Termo gravimétrico post tratamiento

En la figura 30, se muestra los resultados del análisis termo gravimétrico del material, con el fin de evaluar el efecto del número de lavados sobre la estabilidad térmica, y los procesos de degradación asociados a la pérdida de masa en función de la temperatura.

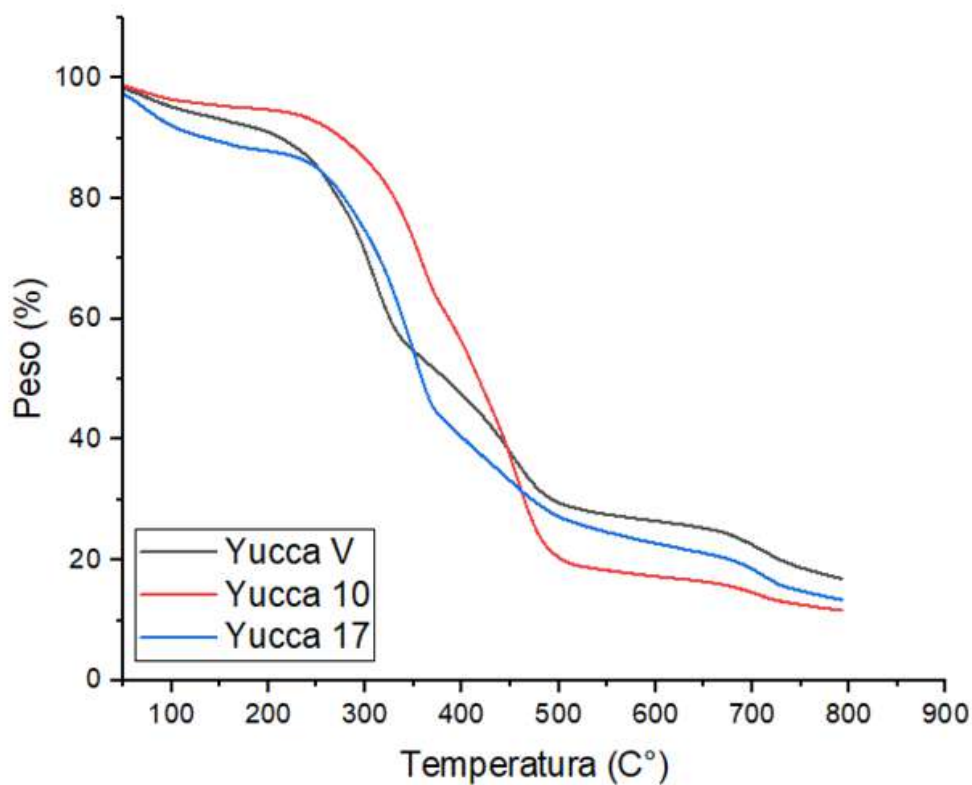


Figura 30. TGA del bio-agregado post tratamiento.

Por último, se empleó el análisis termogravimétrico, a partir de los resultados obtenidos, se determinó que el lavado número 10 representa una condición adecuada y suficiente de tratamiento. Como se observa en la figura 30, la curva correspondiente a este lavado presenta una pérdida de masa progresiva y controlada, manteniéndose sin variaciones significativas hasta temperaturas aproximadas a los 500 °C, lo cual indica una mayor resistencia a la degradación térmica de sus componentes. Este comportamiento determina que, tras diez ciclos de lavado, el material alcanza un equilibrio en el que se han removido compuestos solubles, extractivos y fases amorfas, sin comprometer la integridad cristalina de la celulosa. La estabilidad térmica observada puede asociarse a una mejor organización estructural del bio-agregado, así como a la conservación de enlaces intermoleculares que contribuyen a la resistencia térmica del bio-agregado.

En contraste, el material sometido al lavado número 17 presenta una mayor inestabilidad térmica, evidenciada por una pérdida de masa más pronunciada a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento indica una degradación acelerada de los compuestos orgánicos de la yucca. Por lo que no es viable y comprueba lo antes descrito en el análisis por DRX.

3.5 Determinación de propiedades físicas por recomendaciones RILEM TC 236-BBM

En esta etapa se realizó la determinación de las propiedades físicas del bio-agregado mediante las recomendaciones RILEM TC 236-BBM [20], con el objetivo de evaluar el efecto del tratamiento de hornificación sobre su comportamiento físico y microestructural. Esta caracterización permite identificar cambios asociados a la estructura del material, los cuales influyen directamente en su interacción con la matriz cementante y en el ajuste de los parámetros para el diseño de mezcla.

Los resultados del contenido inicial de agua por RILEM TC 236-BBM [20] se muestran en la tabla 6, donde se permite comparar las propiedades de la *Yucca Carnerosana* con otros bio-agregados reportados en la literatura, como el *Agave Salmiana* y la Cáscara de cacahuate [4,6]. En el caso del contenido de agua inicial, la yucca presenta un valor promedio del 70% ligeramente inferior al reportado para el agave (85.27%), lo cual sugiere una menor capacidad de absorción inicial, esto atribuible a diferencias en la composición interna del material. La densidad aparente promedio de la yucca fue de 0.33 g/cm³, valor comparable al del *Agave salmiana* (0.33 g/cm³) y superior a la de la cáscara de cacahuate (0.12 g/cm³). Esta diferencia confirma que, aunque todos son materiales lignocelulósicos, presentan variaciones en su estructura interna, las cuales influyen en su desempeño térmico [58]. La yucca mostró una conductividad térmica de 0.03 W/m·K, la más baja entre los materiales comparados, lo que se refleja en una resistencia térmica significativamente mayor de 3236.25°C·cm/W.

Tabla 6. Propiedades de los bio-agregados en base a las recomendaciones RILEM

Bio-agregado	Yucca Carnerosana	Agave Salmiana	Cascara de Cacahuate
Contenido inicial de agua promedio (%)	70.00	85.27	SD
Densidad aparente promedio (g/cm ³)	0.33	0.33	0.12
Conductividad térmica (W/mK)	0.03	0.07	0.05
Resistencia térmica (°C.cm/W)	3236.25	1364.55	1841.60

SD= Sin Datos

3.5.2 Distribución de tamaño de partículas

Se puede observar la granulometría en la tabla 7. Como se mencionó en la metodología, se realizó con las mallas 4 (4.75 mm), 8 (2.36 mm), 16 (1.18 mm) y 30 (0.6mm), realizando un cuarteo para obtener muestras representativas y homogéneas.

Tabla 7. Granulometría del bio-agregado

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (%)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% Que pasa
4	4.75	98.5	82.08	82.08	17.92
8	2.36	21.5	17.92	100	0
16	1.18	0	0	100	0
30	0.6	0	0	100	0

El comportamiento observado en la tabla 7 esta directamente relacionado con el proceso de preparación del material, ya que el bio-agregado fue cortado a un tamaño aproximado de 5 mm previo a su caracterización. Esta decisión explica la concentración que se obtuvo del material en las mallas No.4, reteniendo un porcentaje del 82.08%, mientras que el 17.92% restante logró pasar dicha malla y fue retenido en la malla No.8. Esto explica que el porcentaje que pasa por la malla No.4 sea únicamente del 17.92% y que no se observe paso de material a través de las mallas No.16 y No.30, por lo tanto se obtuvo un agregado grueso. Este control del tamaño de partícula se realizó con el objetivo de estandarizar el bio-agregado y reducir la variabilidad en cuanto a formas y tamaños irregulares.

3.5.3 Absorción de agua

La absorción de agua del bio-agregado se evaluó a diferentes tiempos de inmersión mencionado en la metodología. Los resultados obtenidos para la *Yucca Carnerosana* se comparan con los valores reportados en la literatura para el *Agave Salmiana*, y se presentan en la tabla 8 y la figura 31.

Tabla 8. Resultados de absorción de bio-agregados

Bio-agregados	Tiempos de inmersión				
	1 min	15 min	4 h	24 h	48 h
Yucca Carnerosana absorción (%)	76.45	111.40	135.20	159.10	169.70
Agave Salmiana absorción (%) [4]	135.72	202.76	290.43	333.47	330.55

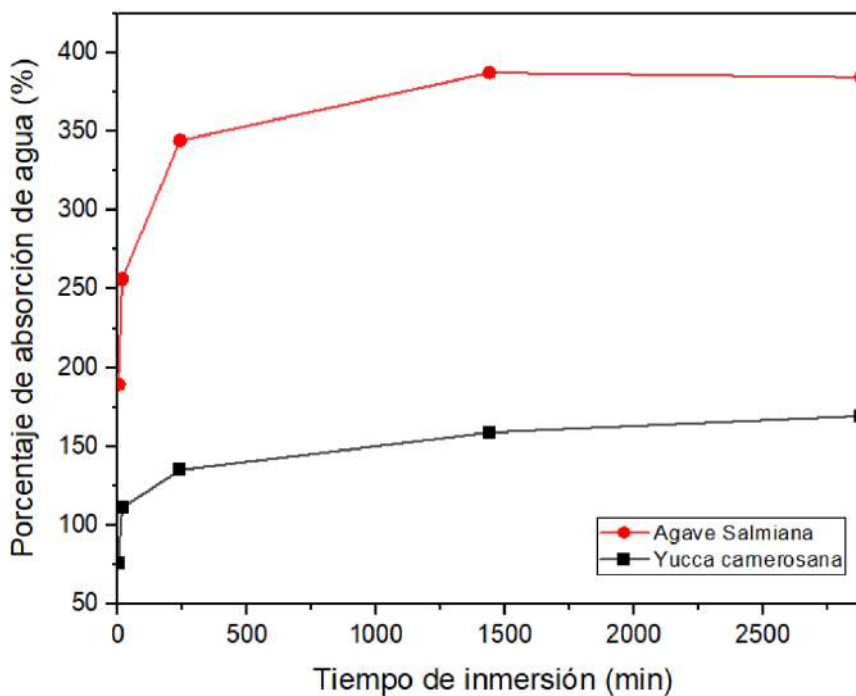


Figura 31. Absorción del bio-agregado de yucca.

Como se observa en la figura 31 y en la tabla 8, el bio-agregado de yucca presenta un incremento progresivo en la absorción de agua conforme aumenta el tiempo de inmersión, alcanzando un valor máximo de 169.7% a las 48 h. Desde los primeros minutos se observa una absorción del 76.45% a 1 min, lo que indica una rápida interacción del agua con la estructura porosa del material. Al comparar estos resultados con el del agave, se observa un comportamiento similar en cuanto a tendencia, aunque con valores mayores. El agave presenta una absorción inicial de 135.72% a 1 min, alcanzando valores superiores al 330% a las 24 y 48 h, casi el doble de lo registrado para la yucca. Estas diferencias pueden atribuirse a variaciones en la estructura interna y al tamaño de poro de cada bio-agregado.

La elevada absorción de agua observada en ambos materiales confirma lo reportado en la literatura para bio-agregados [4-6], donde se asocia este comportamiento con una alta porosidad. Dicha porosidad, favorece la formación de cavidades internas que por lo tanto reducen la conductividad térmica, contribuyendo a un mejor desempeño como material aislante. Este comportamiento es relevante para el diseño de mezcla, ya que permite ajustar la cantidad de agua del bio-agregado para controlar su absorción.

3.6 Diseño de experimentos

Con el fin de evaluar de manera optimizada y sistemática la influencia de las variables que intervienen en la elaboración de los bloques con bio-agregado de yucca, se empleó un diseño de experimentos factorial. Esta metodología me permitió analizar de forma sistemática el efecto que tiene el bio-agregado individual y combinado de los factores seleccionados sobre las propiedades físico-mecánicas del material, optimizando el número de ensayos experimentales. A partir de este enfoque el cual se le conoce como estadístico, fue posible definir los parámetros óptimos locales de la dosificación de la mezcla y evaluar la significancia de cada variable en el desempeño del material, proporcionando una base objetiva para la interpretación y discusión de los resultados obtenidos como se muestran en las siguientes figuras.

Tabla 9. Diseño factorial

	Std	Run	Factor 1 A:BIOAGREGADO %	Factor 2 B:CENIZA VOLANTE %	Factor 3 C:AGUA/CEMENTO	Factor 4 D:ADITIVO %	Response 1 RESISTIVIDAD TERMICA mK/W	Response 2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPa
	5	1	25	10	0.5	0.02	0.7644	1.14
	4	2	40	15	0.45	0	1.728	0.91
	6	3	40	10	0.5	0	1.727	1.15
	3	4	25	15	0.45	0.02	0.8123	4.28
	7	5	25	15	0.5	0	1.399	1.86
	1	6	25	10	0.45	0	1.3981	1.68
	2	7	40	10	0.45	0.02	1.1846	1.85
	8	8	40	15	0.5	0.02	1.021	1.72

En esta tabla 9, se presentan las combinaciones experimentales generadas por el programa con el objetivo de obtener un experimento confiable. El diseño empleado es de carácter exploratorio, por lo que se seleccionaron cuatro factores a analizar. En donde se muestra el bio-agregado como primer factor teniendo como rango menor el 25% y en mayor un 40%. El segundo factor fue la ceniza volante de 10 a 15 %.

Asi mismo se considero la relación agua/cemento 0.45 a 0.5 y como aditivo del 0 a 0.02%. Se evaluaron dos variables de respuesta : la resistividad térmica y resistencia a la compresión. De acuerdo con los resultados obtenidos, la corrida número 4 presentó una mayor resistencia a la compresión; sin embargo, la

corrida número 2 mostró la mayor resistividad térmica, aunque con valores reducidos de resistencia mecánica. Ante este comportamiento, se realizó un análisis comparativo entre ambos puntos experimentales, optando por la selección de valores intermedios de los factores on el fin de obtener una respuesta balanceada que permitiera una gran respuesta entre el desempeño térmico y resistencia a la compresión. Por lo tanto se tomo un juicio entre los dos puntos experimentales.

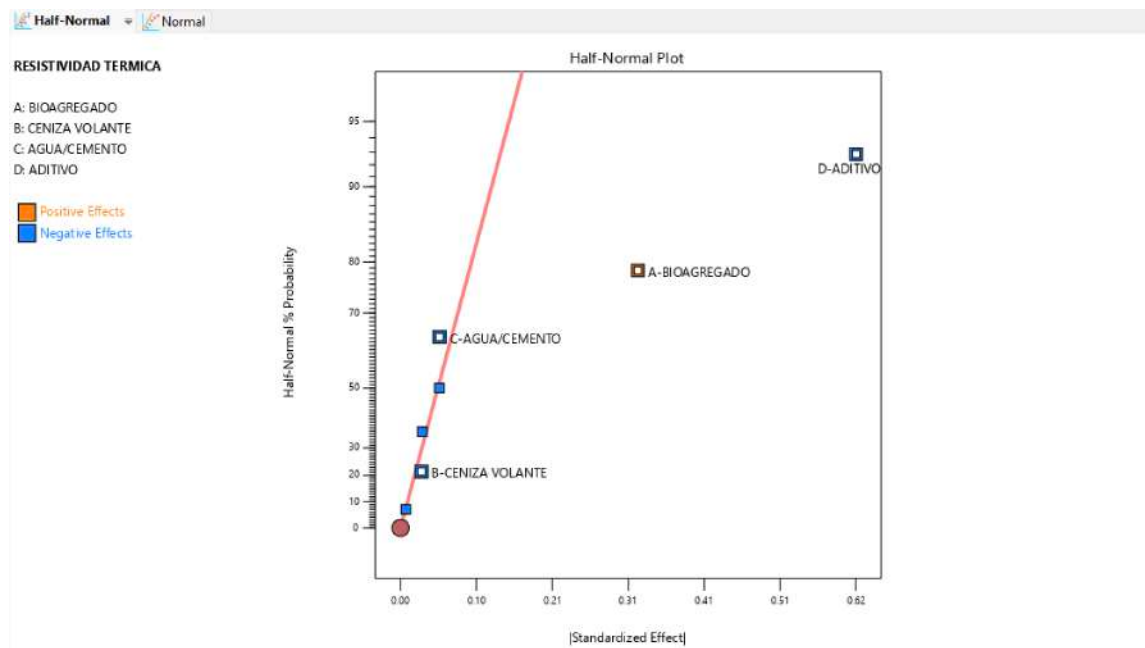


Figura 32. Pareto de resistividad térmica.

En la Figura 32, se presenta el diagrama de Pareto, en el cual se observa el comportamiento de los factores que influyen en la resistividad térmica del material. En este tipo de análisis, aquellos factores que se encuentran a mayor distancia del eje de referencia presentan una mayor significancia estadística sobre la respuesta evaluada. En particular, se identifica que el contenido de aditivo y el bio-agregado son los factores más influyentes en la resistividad térmica, lo que permite concluir que ambos parámetros desempeñan un papel determinante en el desempeño térmico del material.

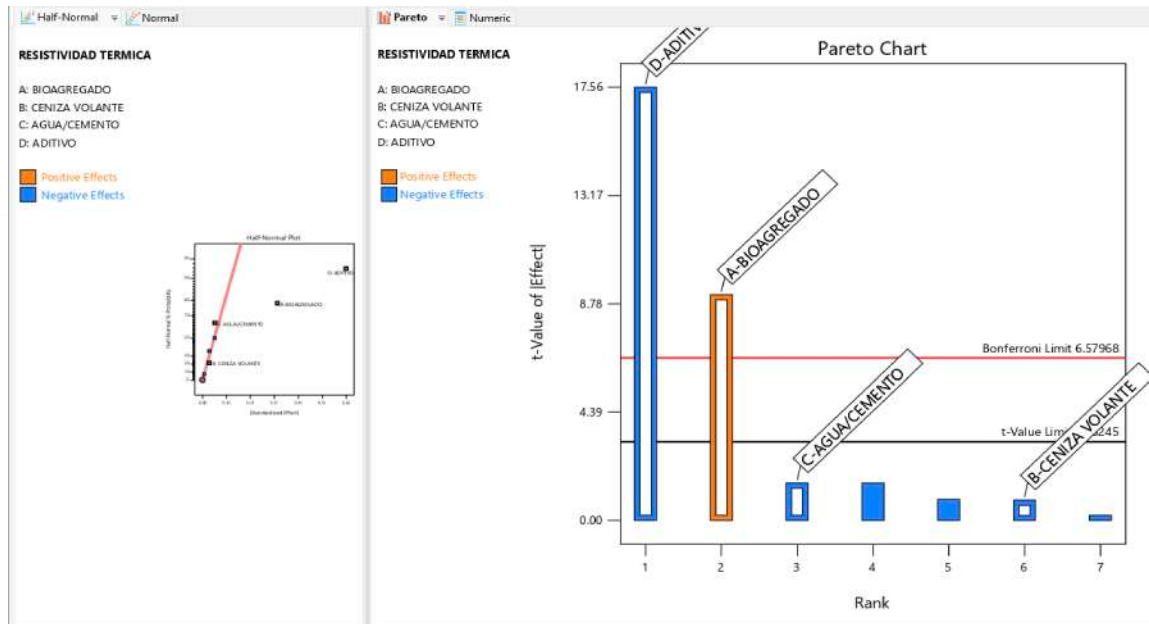


Figura 33. Pareto rank resistividad térmica.

En la Figura 33, se muestran los efectos positivos y negativos de los factores evaluados dentro del diseño experimental. A partir de este análisis, se observa que las interacciones asociadas al contenido de aditivo y al bio-agregado son las que presentan mayor influencia sobre la resistividad térmica.

Los resultados indican que un incremento en el contenido de aditivo tiende a disminuir la resistividad térmica del material, mientras que un mayor contenido de bio-agregado favorece el aumento de esta propiedad. Este comportamiento sugiere que ambos factores deben ser cuidadosamente controlados para optimizar el desempeño térmico.

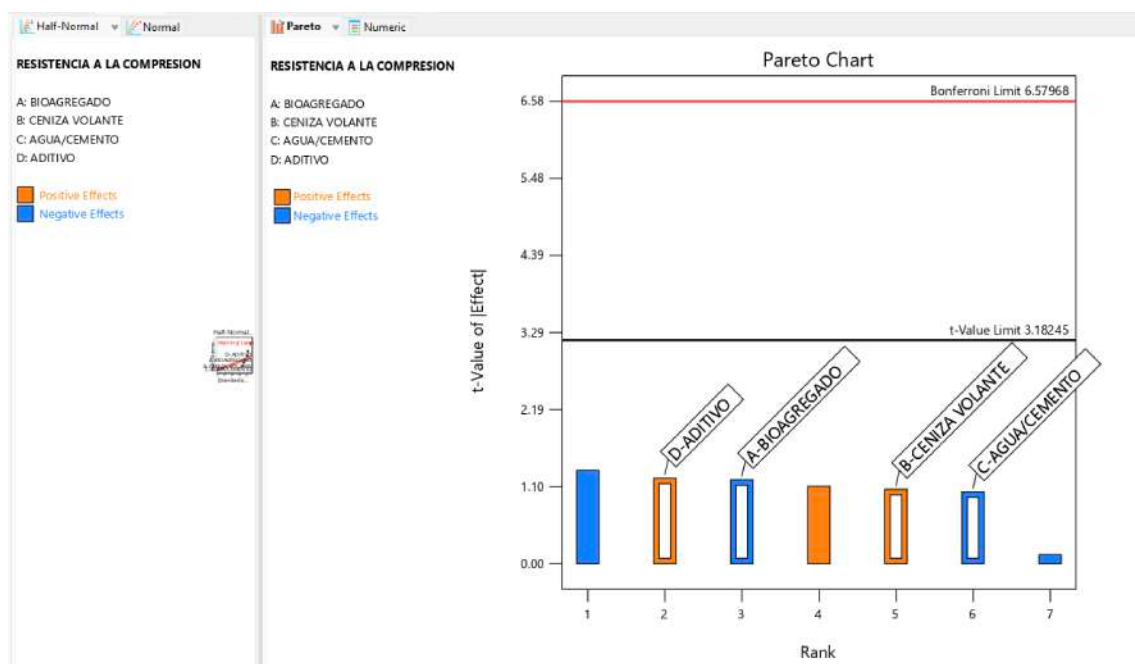


Figura 34. Pareto resistencia a la compresión.

En la Figura 34 se observa que ninguno de los factores evaluados presenta una influencia significativa sobre la respuesta analizada. Este comportamiento no indica la presencia de errores en la medición; por el contrario, se atribuye a la limitada cantidad de corridas experimentales realizadas, lo cual restringe la capacidad del modelo para identificar efectos estadísticamente relevantes.

Por lo tanto al final, se optó por utilizar como medidas de referencia para elaborar los bloques:

Tabla 10. Diseño final

Bio-agregado	Ceniza Volante	Agua/cemento	Aditivo
25%	16%	0.45	0.01%

Como se muestra en la Tabla 10, el contenido de aditivo fue reducido a la mitad con el objetivo de minimizar su interferencia en la resistividad térmica, sin comprometer el incremento en la resistencia mecánica. Esta modificación permitió obtener un bloque que cumple con los requisitos establecidos, logrando

un equilibrio entre desempeño estructural, capacidad de aislamiento térmico y durabilidad, lo que confirma la viabilidad del material desarrollado para aplicaciones en la construcción.

3.7 Condiciones ambientales durante el periodo de exposición

Con la finalidad de caracterizar las condiciones ambientales a las que estuvieron expuestos los bloques durante el periodo de 3 y 6 meses, se analizaron los datos registrados por la estación meteorológica del sitio experimental. Se consideraron variables como precipitación, radiación solar, humedad relativa y temperatura, las cuales influyen a su vez en los procesos físicos-químicos que ocurren en los materiales cementantes, tales como la hidratación, carbonatación y ciclos de humectación y secado. La figura 35, muestra la variación de estas variables durante el periodo de agosto 2025 a febrero 2026.

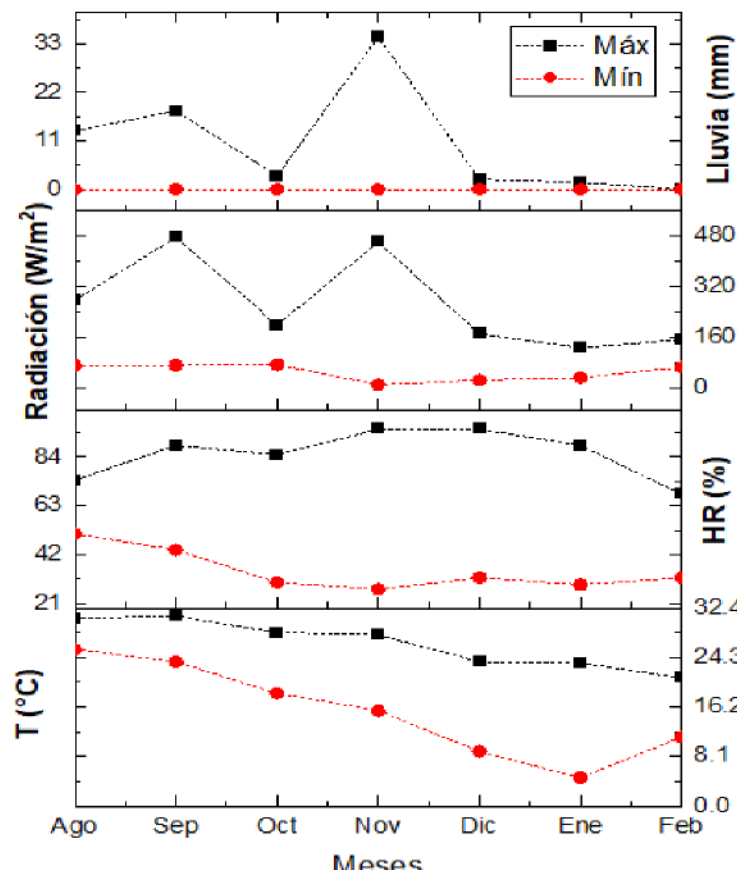


Figura 35. Condiciones ambientales durante el periodo de exposición.

La figura 35, presenta la variación de temperatura, humedad relativa, radiación solar y lluvia registradas durante el periodo de exposición de los bloques. En general, se observaron fluctuaciones típicas de condiciones ambientales naturales, caracterizadas por variaciones periódicas de humedad y eventos de precipitación que favorecen ciclos de humectación y secado en los materiales.

La presencia de periodos con alta humedad relativa y lluvia nos proporciona disponibilidad de agua para la continuidad de los procesos de hidratación de la matriz cementante, mientras que los periodos de radiación y temperatura favorecen el secado parcial del material. Estos ciclos de humedad y secado pueden provocar tanto la hidratación tardía como procesos de carbonatación, fenómenos que influyen en la evolución de la microestructura y en el comportamiento mecánico de los bloques.

En este contexto, las condiciones ambientales registradas durante el periodo de agosto 2025 a febrero 2026 constituyen un factor relevante para interpretar los resultados obtenidos en los ensayos que se verán más adelante y en el análisis mineralógico mediante DRX.

3.8 Pruebas de los bloques con bio-agregado en la HotBox

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico de los bloques elaborados con bio-agregado, se realizaron ensayos mediante el equipo HotBox, el cual permitió obtener la transferencia de calor a través de elementos constructivos bajo condiciones controladas. A partir de las mediciones obtenidas durante el estado estacionario del sistema, se calculó el coeficiente de transmitancia térmica (U) de cada muestra. Los resultados obtenidos para los diferentes bloques se presentan en la tabla 11. En la figura 36, se muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo para los bloques evaluados. Se observa que las curvas tienden a estabilizarse con el transcurso del tiempo, lo que indica que el sistema alcanzó

condiciones de estado estacionario, requisito fundamental para la validez de las mediciones térmicas realizadas.

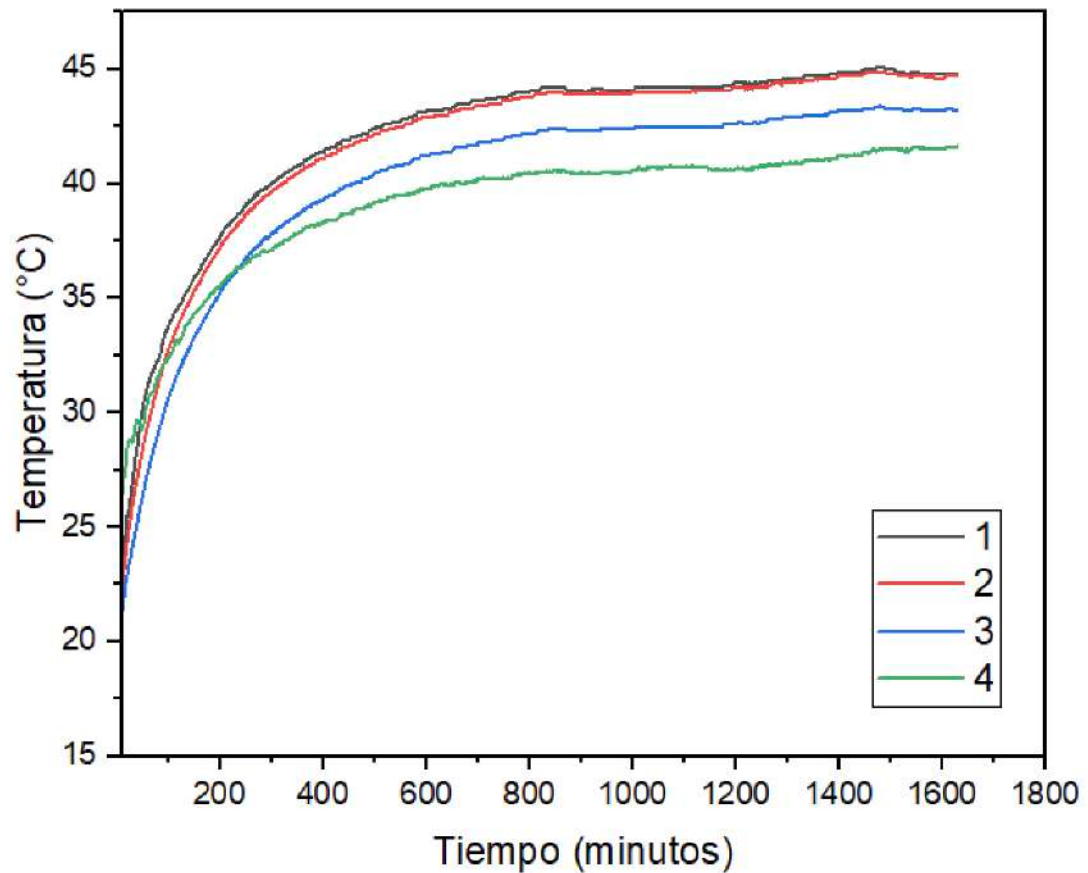


Figura 36. Evolución de la temperatura en función del tiempo para la verificación del estado estacionario en el ensayo HotBox.

Tabla 11. Resultados de las mediciones de la HotBox

Bloques	Muestra 1 (U)	Muestra 2 (U)	Promedio de las muestras U (w/m ² k)
Control (Comercial)	6.85	6.19	6.52

Bio-Bloque (Referencia)	3.30	5.79	4.54
Ciclos de humectación y secado	6.43	6.48	6.45
Intemperie a 3 meses	6.50	6.18	6.34
Intemperie a 6 meses	6.73	6.88	6.80

El valor de transmitancia térmica obtenido para el bio-bloque en condición de referencia ($4.54 \text{ w/m}^2\text{k}$) fue menor que el registrado para el concreto control ($6.52 \text{ w/m}^2\text{k}$), lo cual indica una mayor capacidad de aislamiento térmico del material con bio-agregado.

Este comportamiento puede atribuirse principalmente a la mayor porosidad del sistema introducida por la presencia del bio-agregado [59].

Los materiales lignocelulósicos suelen presentar una estructura interna porosa y baja conductividad térmica, lo que favorece la retención de aire dentro de la matriz [60]. No obstante, tras la aplicación de ciclos de humectación y secado, la exposición a condiciones de intemperie, los valores de transmitancia térmica aumentaron progresivamente. Este comportamiento podría estar asociado a procesos de densificación de la matriz cementante, derivados de la continuidad de las reacciones de hidratación y de cambios en la estructura porosa del material [44].

3.9 Resistencia a la compresión en bloques

En la siguiente figura 37, se muestran los resultados de resistencia a compresión de los bloques en diferentes condiciones de exposición.

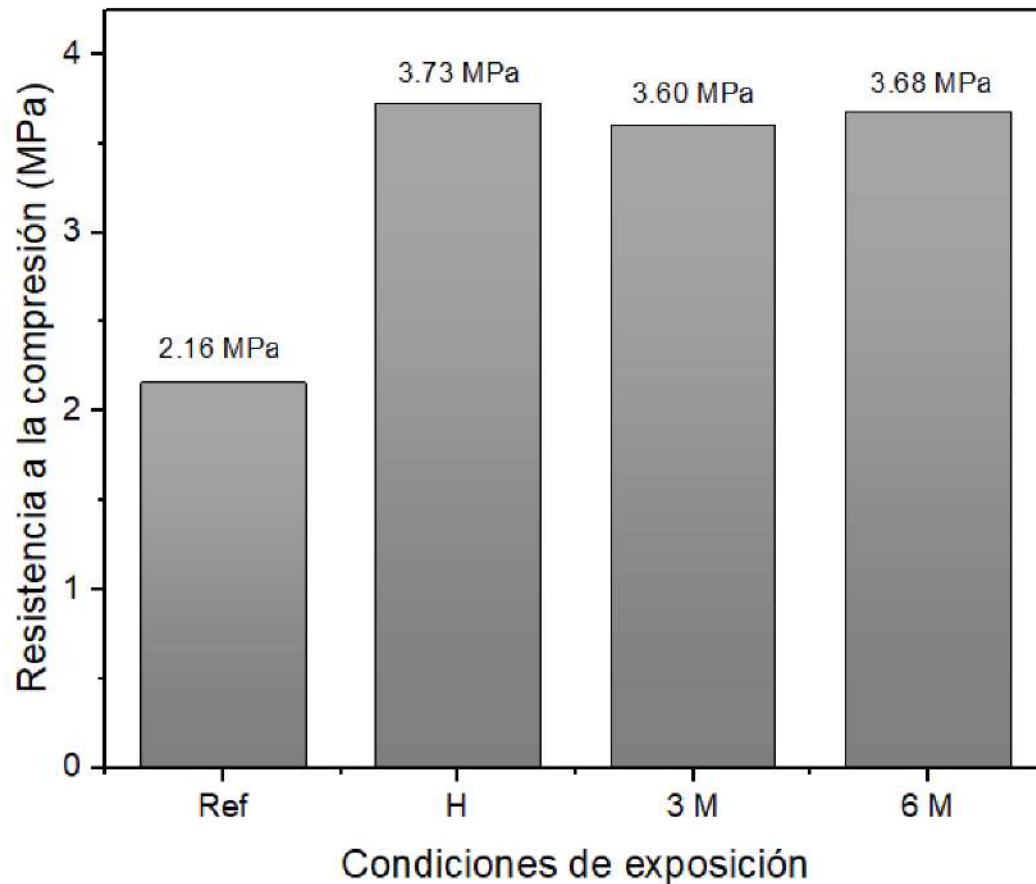


Figura 37. Resistencia a la compresión de los bloques con diferentes condiciones de exposición.

Los resultados de resistencia a compresión mostraron un comportamiento diferenciado según las condiciones de exposición. El bloque de referencia (Ref) presentó una resistencia promedio de 2.16 Mpa, valor inferior al mínimo establecido en la normativa NMX-C-411-ONNCCE [33]. En comparación con los especímenes sometidos a ciclos de humectación y secado (H), alcanzaron una resistencia de 3.73 Mpa, mientras que los bloques expuestos a intemperie durante 3 y 6 meses registraron valores de 3.60 Mpa y 3.68 Mpa.

El incremento observado en las muestras expuestas a condiciones puede atribuirse a la continuidad de los procesos de hidratación del cemento y a posibles reacciones puzolánicas asociadas a la ceniza volante utilizada, favorecidas por la humedad.

A diferencia del bloque de referencia, el cual, posiblemente experimentó una hidratación limitada por disponibilidad de la humedad [44]. Por lo tanto, las condiciones de exposición favorecieron la formación adicional de productos cementantes. Asimismo, la posible carbonatación superficial pudo influir en el aumento de resistencia al generar fases más estables como carbonato de calcio [61].

En términos normativos, los bloques expuestos cumplen con la resistencia mínima requerida para unidades no estructurales, a diferencia del bloque de referencia.

3.10 Análisis de las pruebas de deterioro

Las pruebas de deterioro se realizaron con el objetivo de evaluar el comportamiento de los bloques con bio-agregado bajo diferentes condiciones de exposición. El análisis de estas pruebas permitió identificar posibles cambios en el desempeño mecánico y en la estabilidad del material.

3.10.1 Análisis de los bloques en diferentes condiciones mediante DRX

Con el fin de analizar los posibles cambios mineralógicos de las diferentes condiciones de exposición, se realizó el análisis por difracción de rayos X, el cual se muestra en la figura 38.

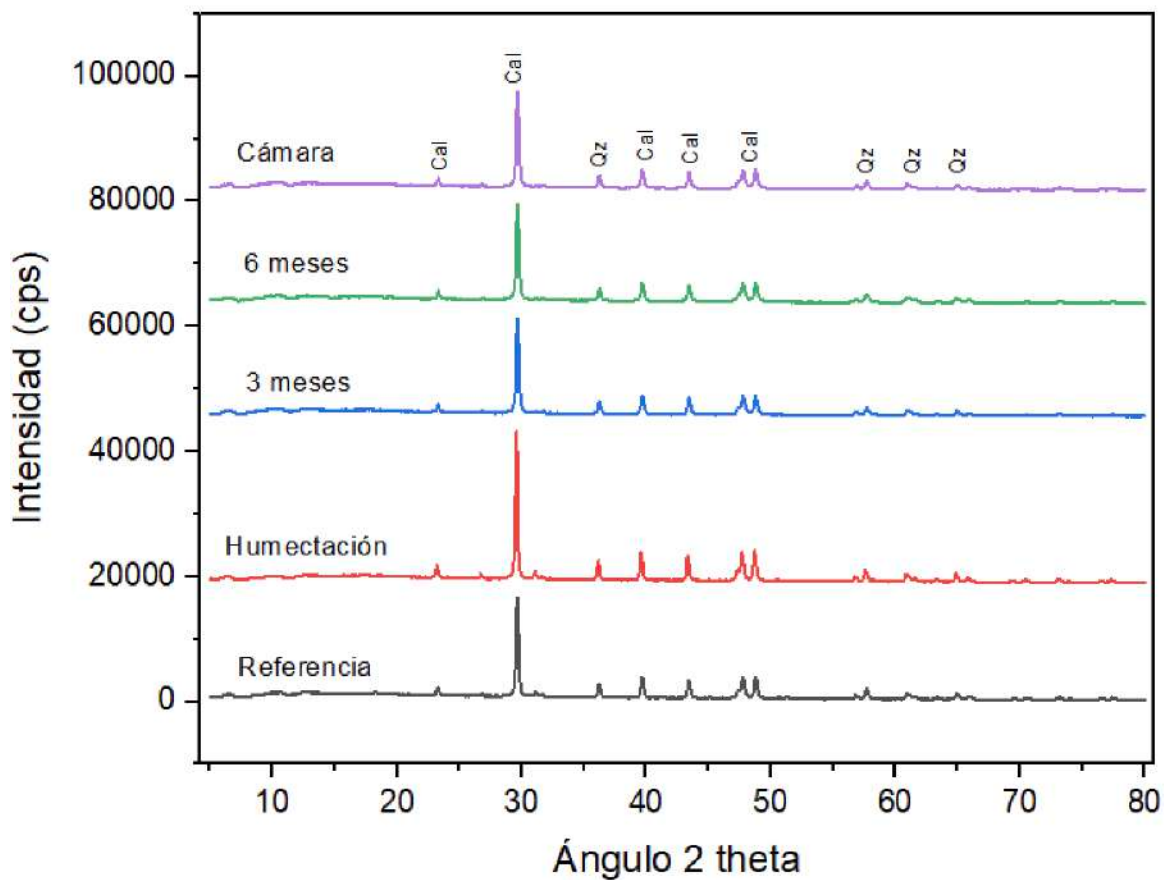


Figura 38. Difractogramas de los bloques a diferentes condiciones.

El análisis comparativo de los difractogramas de la figura 38, correspondientes a los bloques con bio-agregado mostró patrones mineralógicos similares en todas las condiciones de exposición evaluadas.

En todos los casos se identificó como fase cristalina predominante la Calcita (Cal), evidenciada por el pico de alta intensidad alrededor de $29.5^\circ 2\theta$ e intensidades secundarias en la región de 39° a $48^\circ 2\theta$. La presencia dominante de esta fase sugiere la aparición de procesos de carbonatación dentro de la matriz [46].

Asimismo, se observaron picos característicos de Cuarzo (Qz), asociados al agregado fino utilizado en la mezcla, principalmente alrededor de 26° y en el intervalo de 59° a 70° 2θ [62]. Esta fase corresponde al componente mineral de la matriz y no participa dentro de las reacciones de hidratación [63].

En la región comprendida entre 20° y 35° 2θ se aprecia una señal difusa atribuible a componentes amorfos, posiblemente relacionados con productos de hidratación del cemento y con una fracción de la ceniza volante[64]. No se identificaron fases expansivas ni compuestos que puedan indicar la degradación del material.

La predominancia de la calcita y la limitada evidencia de fases hidratadas cristalinas, sugieren que la matriz experimentó procesos de carbonatación y reacciones de hidratación prolongadas. La literatura reporta que en sistemas cementantes con adiciones puzolánicas la hidratación puede extenderse a edades más avanzadas, favoreciendo a la microestructura y contribuyendo al desarrollo progresivo de la resistencia mecánica [44][50][65].

3.10.2 Análisis de los bloques en diferentes condiciones mediante FTIR

Con el propósito de analizar los posibles cambios de grupos funcionales dentro

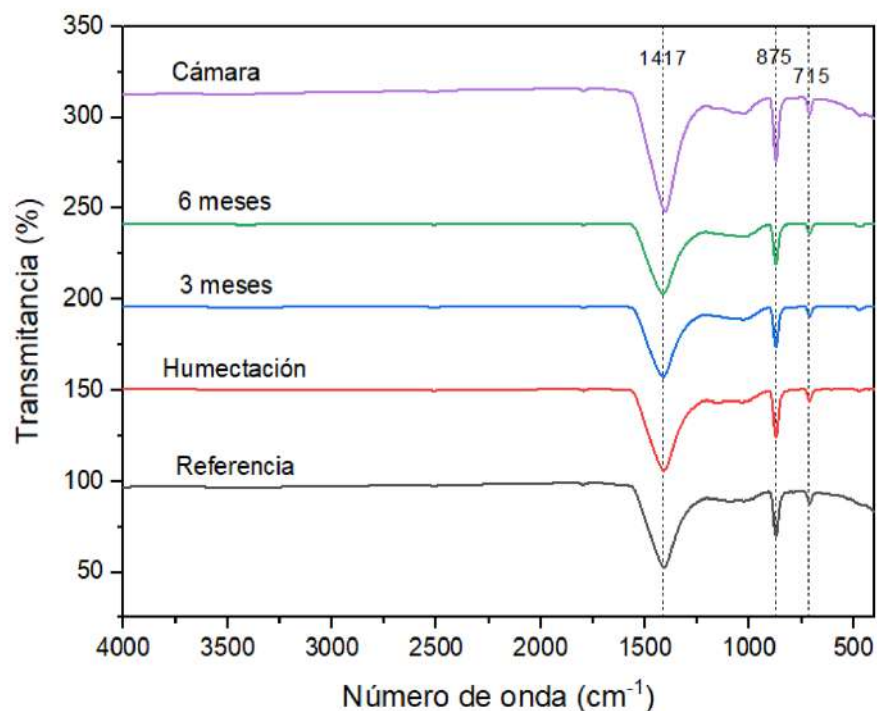


Figura 39. Espectroscopía de los diferentes bloques.

En la figura 39, se muestran los resultados por espectroscopía infrarroja (FTIR) de los bloques elaborados con bio-agregado. Se mostró espectros similares en todas las condiciones evaluadas, lo que sugiere que la composición química de la matriz se mantiene estable. En todos los casos se identificaron bandas características alrededor de 1417, 875 y 715 cm^{-1} , asociadas a las vibraciones del ion carbonato (CO_3^{2-}), típicas de la calcita, lo cual indica la presencia de productos de carbonatación dentro de la matriz cementante [53]. Asimismo, se observan señales relacionadas con fases silicatadas provenientes tanto del agregado fino como de los productos de hidratación del cemento. La similitud entre los espectros obtenidos bajo las distintas condiciones de exposición indica que no se produjeron cambios químicos significativos en la matriz del material. En materiales cementantes con adiciones puzolánicas, la presencia de

carbonatos y fases silicatadas es común debido a procesos de hidratación y carbonatación que ocurren durante la exposición ambiental [48].

Capítulo 4- Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- El bio-agregado evidenció una composición lignocelulósica característica de materiales de origen vegetal, lo cual condiciona su comportamiento frente a procesos térmicos y químicos. Esta naturaleza orgánica influye directamente en sus propiedades, particularmente en su desempeño térmico y en su interacción con la matriz cementante.
- La incorporación del bio-agregado modificó el comportamiento mecánico del sistema, observándose un incremento en la resistencia a la compresión en las muestras expuestas en comparación con el bloque de referencia. Este comportamiento se asocia principalmente a los ciclos de humectación, los cuales favorecen procesos adicionales de hidratación del cemento dentro de la matriz, contribuyendo al desarrollo progresivo de la resistencia al material.
- Los bloques con bio-agregado mostraron una menor estabilidad frente a los procesos de envejecimiento, lo que indica que la presencia de componentes lignocelulósicos afecta su desempeño cuando el material se expone a condiciones ambientales adversas.
- El diseño experimental permitió establecer la influencia del bio-agregado en la matriz cementante, evidenciando diferencias entre las formulaciones estudiadas. Asimismo, facilitó la identificación de la interacción entre las variables del sistema, aportando una mejor comprensión del comportamiento del material.
- El monitoreo de las condiciones ambientales permitió establecer la influencia de las variables climáticas sobre el comportamiento de los bloques, aportando un contexto real para la interpretación de los resultados experimentales.
- Los bloques con bio-agregado mostraron diferencias en su comportamiento térmico respecto a los bloques comerciales, asociadas a su capacidad de aislamiento. No obstante, la exposición a condiciones ambientales y a ciclos de

humectación, secado e intemperismo modificó sus propiedades térmicas, influyendo en su desempeño a lo largo del tiempo.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el estudio de tratamientos previos del bio-agregado con el fin de mejorar su compatibilidad con la matriz cementante. Procesos como tratamientos químicos, térmicos o recubrimientos podrían contribuir a reducir la absorción de agua del material lignocelulósico y mejorar la adherencia.

Asimismo, se sugiere evaluar diferentes proporciones de incorporación del bio-agregado dentro de la mezcla, con el objetivo de identificar contenidos óptimos que permitan equilibrar las propiedades mecánicas, térmicas y de durabilidad.

Se recomienda ampliar los estudios relacionados con la durabilidad de bloques, considerando periodos más extensos y diferentes condiciones ambientales que permitan comprender a detalle el comportamiento del material.

En la relación con el comportamiento térmico, se recomienda probar con diferentes geometrías o combinaciones de otros materiales que permitan mejorar el desempeño térmico de los bloques.

Capítulo 6- Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- [1] Oxford Economics. (2023). *Global construction sector on track to reach \$13.9 trillion by 2037*. Oxford Economics.
- [2] Research and Markets. (2024). *Mexico Construction Market Size, Trends and Forecasts by Sector (Commercial, Industrial, Infrastructure, Energy and Utilities, Institutional and Residential) Analysis and Forecast, 2025-2029*. Research and Markets.
- [3] MarketDataMéxico. (s.f.). *Fábricas de tubos y bloques de cemento y concreto en México*. Recuperado el 2 de mayo de 2025, de <https://www.marketdatamexico.com/es/article/Fabricas-tubos-bloques-cemento-concreto-Mexico>
- [4] Rosas D., F. (2021). *Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de cemento Portland con agregado vegetal lignocelulósico de agave*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [5] Lira Rodríguez, R. (2023). *Efecto de la exposición a diferentes ambientes agresivos en el comportamiento físico y mecánico de materiales compuestos a base de cemento Portland y bioagregados de Agave salmiana*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [6] Nuñez Hernández, D. Y. (2023). *Concretos vegetales con agregados orgánicos provenientes de los residuos de la cáscara de cacahuete: Estudio de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [7] Ballesteros, J. E. M., dos Santos, V., Mármol, G., Frías, M., & Fiorelli, J. (2017). Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-

cement applications. *Cellulose*, 24(5), 2275–2286.
<https://doi.org/10.1007/s10570-017-1253-6>

[8] Marceau, S., Glé, P., Guéguen-Minerbe, M., Gourlay, E., Moscardelli, S., Nour, I., & Amziane, S. (2017). Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 139, 524–530.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129>

[9] Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Amziane, S., & Farcas, F. (2020). Durability of hemp concretes exposed to accelerated environmental aging. *Construction and Building Materials*, 252, 119043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119043>

[10] Phetcharat, S., Buntan, R., Budcha, P., Ruekrai, R., & Joyklad, P. (2025). PROPERTY IMPROVEMENT OF HEMP-ENHANCED INTERLOCKING BLOCKS WITH DURABILITY EVALUATION AND ENERGY EFFICIENCY. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 32(1), 010351(1-11).
<https://doi.org/10.55766/sujst7161>

[11] Andreola, V. M., Hasparyk, N. P., & Toledo Filho, R. D. (2024). Effect of Natural Weathering on the Mechanical Strength of Bamboo Bio-Concrete. *Buildings*, 14(11), 3629. <https://doi.org/10.3390/buildings14113629>

[12] Phetcharat, S., Buntan, R., Budcha, P., Ruekrai, R., & Joyklad, P. (2025). PROPERTY IMPROVEMENT OF HEMP-ENHANCED INTERLOCKING BLOCKS WITH DURABILITY EVALUATION AND ENERGY EFFICIENCY. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 32(1), 010351(1-11).
<https://doi.org/10.55766/sujst7161>

[13] Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., Silva, F. A., & Toledo Filho, R. D. (2012). Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com

matrizes de cemento Portland. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 17(2), 1024–1034.
<https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>

[14]C. Juarez, “Concreto base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construccion en mexico,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2002.

[15] Leyva Cervantes, M. del R. (2014). Durabilidad de compuestos a base de matrices minerales reforzados con fibras naturales. Universidad Autónoma de Nuevo León.

[16] Rechy de Von Roth, M.A (s.f.) Estudio Integral Tecnológico de cinco especies del genero Yucca para uso industrial. Universidad Autónoma de Nuevo León.

[17] Glé, P., Gourdon, E., & Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72(5), 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>

[18] Jácome, S., Suntaxi, M., & Dueñas, M. (2019). Análisis de las propiedades de bloques de construcción a partir de la fabricación de los mismos, con materiales reciclados como el PET, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar y cáscara de maní. Observatorio de la Economía Latinoamericana

[19] Mendes, S., Hugen, L. N., dos Santos, R. D., Toledo Filho, R. D., & Ferreira, S. R. (2021). Influence of Water Amount and Immersion Time on the Sisal Fibers Hornification Process. *Journal of Natural Fibers*, 18(11), 1712–1721. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1697990>

- [20] 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>
- [21] Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Energy and Buildings*, 82, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.039>
- [22] El-Feky, M. S., Kohail, M., & Serag, M. I. (2016). Thermal performance characterization of cement-based masonry blocks incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 104, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.064>
- [23] Alhawari, A., & Mukhopadhyaya, P. (2022). Construction and calibration of a unique hot box apparatus. *Energies*, 15(13), 4677. <https://doi.org/10.3390/en15134677>
- [24] Sheldon S, (1980). *Ethnobotany of Agave lecheguilla and Yucca carnerosana in Mexico's Zona Ixtlera*. Springer. <https://www.jstor.org/stable/i389419>
- [25] José T, Alma R, Saucedo, Juan R y Maria L. (2008). Comportamiento de la Fibra de Celulosa Reciclada en el Proceso de Hidratación. *Información Tecnológica* Vol. 19(5), 129-136. doi:10.1612/inf.tecnol.3955it.07
- [26] Fernandes Diniz, J. M. B., Gil, M. H., & Castro, J. A. A. M. (2004). Hornification—Its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Science and Technology*, 37(6), 489–494. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0216-2>

[27] Laivins, G. V., & Scallan, A. M. (1993). The effect of drying and beating on the swelling of wood pulp fibres. *Journal of Pulp and Paper Science*, 19(6), J289–J292.

Kato, K. L., & Cameron, R. E. (1999). A review of the relationship between thermally accelerated ageing of paper and hornification of cellulose fibres. *Polymer Degradation and Stability*, 65(2), 303–312. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00024-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00024-7)

[28] Kato, K. L., & Cameron, R. E. (1999). A review of the relationship between thermally accelerated ageing of paper and hornification of cellulose fibres. *Polymer Degradation and Stability*, 65(2), 303–312. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00024-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00024-7)

[29] Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 255–234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>

[30] Alterary, S. S. (2021). Fly ash properties, characterization and applications: A review. *Journal of King Saud University – Science*, 33(6), 101536.

[31] Nayak, D. K., & colaboradores. (2022). A review of fly ash concrete and its beneficial use.

Lv, T., et al. (2024). Durability and sustainable assessment of fly ash-blended cement paste.

[32] Siddique, R. (2011). Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1060–1066. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.003>

[33] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). (2013). *NMX-C-441-ONNCCE-2013: Industria de la construcción—Mampostería—Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural—Especificaciones y métodos de ensayo*. ONNCCE.

[34] TAPPI Standards, 2007. TAPPI Test Methods, Atlanta

[35] ASTM International. (2020). *ASTM C109/C109M-20: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20

[36] ASTM International. (2021). *ASTM C1363-19: Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1363-19>

[37] Wise L.E., Murphy M., D'Adieco A.A. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses, Paper Trade J. 122 (1946).

[38] Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press.

[39] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1981). *IEEE guide for soil thermal resistivity measurements* (IEEE Std 442-1981). IEEE Standards Association.

[40] ASTM International. (2008). *ASTM D5334-08: Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure*. ASTM International.

[41] Silva, F. A., Toledo Filho, R. D., & Melo Filho, J. A. (2021). Characterization of mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.) and its use in lightweight bio-concrete.

Construction and Building Materials, 272, 121630.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>

[42] ASTM International. (2023). *ASTM G154-23: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Materials*. ASTM International.

[43] Zhang, G., et al. (2023). Determining the heat transfer coefficient of sustainable building materials. *Energy*.

[44] Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

[45] Farmer, V. C. (1974). *The infrared spectra of minerals*. London, UK: Mineralogical Society

[46] Bensted, J. (1976). Applications of infrared spectroscopy to cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 6(2), 233–241.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-4)

[47] Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. (2000). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 22(3), 169–176. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00002-2)

[48] Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford.

[49] Scrivener, K. L., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. CRC Press.

[50] Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>

- [51] Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P. (2007). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Materials Science*, 42(9), 299–308. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0325-7>
- [52] Ward, C. R., French, D., & Jankowski, J. (2006). Comparative evaluation of methods for the determination of mineral matter and mineral composition in coal ashes. *Fuel*, 85(16), 2268–2277. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.029>
- [53] Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- [54] Savastano, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2000). Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, 22(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00030-1)
- [55] Nam, S., French, A. D., Condon, B. D., & Concha, M. (2016). Segal crystallinity index revisited by the simulation of X-ray diffraction patterns of cotton cellulose I β and cellulose II. *Carbohydrate Polymers*, 135, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.035>
- [56] Poletto, M., Pistor, V., & Zattera, A. J. (2013). Structural characteristics and thermal properties of native cellulose. *Cellulose*, 20(2), 953–965. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9874-0>

- [57] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- [58] Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
- [59] Jerman, M., Keppert, M., Výborný, J., & Černý, R. (2013). Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.096>
- [60] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- [61] Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*.
- [62] Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [63] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [64] Diamond, S. (2004). The microstructure of cement paste and concrete—A visual primer. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 919–933. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028>

[65] Thomas, M. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete*. Portland Cement Association.