

ARQUITECTURA Y CIENCIA DE MATERIALES

Una experiencia
interdisciplinaria

Alberto Muciño Vélez
Eligio Alberto Orozco Mendoza
Fernando Córdova Canela
(Coordinadores)



**Arquitectura y Ciencia de Materiales.
Una experiencia interdisciplinaria**

Arquitectura y Ciencia de Materiales. Una experiencia interdisciplinaria

Alberto Muciño Vélez
Eligio Alberto Orozco Mendoza
Fernando Córdova Canela
Coordinadores



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

2025

Esta obra fue evaluada mediante un proceso doble-ciego, por lectores designados por el Consejo Editorial del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Guadalajara.

Primera edición, 2025

D.R. © 2025, UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño
Calz. Independencia Norte 5075, Huentitán El Bajo
C. P. 44250 Guadalajara, Jalisco, México



Este trabajo está autorizado bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercialSinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND) lo que significa que el texto puede ser compartido y redistribuido, siempre que el crédito sea otorgado al autor, pero no puede ser mezclado, transformado, construir sobre él ni utilizado con propósitos comerciales. Para más detalles consúltese <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

ISBN: 978-607-581-864-1

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

Contenido

Prefacio	7
Alberto Muciño Vélez, Eligio Alberto Orozco Mendoza y Fernando Córdova Canela	

SECCIÓN I: FUNDAMENTOS Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

Indentación instrumentada y calorimetría semiadiabática aplicadas al estudio del proceso de hidratación temprana de pastas de cemento tipo Portland.	11
Ashanti Yoseline Martinez Morales y Eligio Alberto Orozco Mendoza	

Simulación computacional del comportamiento mecánico de un sistema de mampostería machi-hembrado	29
Edrey Nassier Salgado Cruz, Cesar Armando Guillén Guillén y Alberto Muciño Vélez	

Avances experimentales para el diagnóstico del concreto en inmuebles patrimoniales mediante la velocidad de pulso ultrasónico	47
Nohema Cassandra Ruiz Gómez y Alberto Muciño Vélez	

SECCIÓN II: OPTIMIZACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

Optimización de morteros por sustitución de áridos para mampostería estructural ligera	69
Antonio Tahuitón Mora y Eligio Alberto Orozco Mendoza	

Siembra de partículas sub-micrométricas de minerales naturales en morteros hidráulicos de cemento	97
Edrey Nassier Salgado Cruz y Alberto Muciño Vélez	

SECCIÓN III: MATERIALES TRADICIONALES EN LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE

Metodología para la evaluación de bambúes nativos de menor diámetro en México, para su aprovechamiento estructural. Caso de estudio <i>Otatea fimbriata</i>	125
Hector Daniel Llaven José, Cesar Armando Guillén Guillén y Alberto Muciño Vélez	

El entrepiso de pajarcilla en la construcción contemporánea. Prefabricación, evaluación y aplicación ante la falta de normativas.	145
Alan Sosa Contreras, Luis Fernando Guerrero Vaca y Alberto Muciño Vélez	

Tierra compactada como material de construcción, evolución y retos actuales.	171
Paula Florentina Barba Márquez, Fernando Córdova Canela y Cesar Armando Guillén Guillén	

Metodología para el desarrollo de sistemas constructivos tipo tapias en México.	183
Alejandro Isidro Jiménez Sandoval, Fernando Córdova Canela y Alberto Muciño Vélez	

Diseño de bloques de tierras comprimidas controlando el efecto de la presión de la elaboración para desestimar el uso de cal y cemento en la mezcla	201
Cesar Armando Guillén Guillén y Alberto Muciño Vélez	

Conclusiones y perspectivas futuras	219
Alberto Muciño Vélez	

Prefacio

Alberto Muciño Vélez*
Eligio Alberto Orozco Mendoza**
Fernando Cordova Canela***

El presente libro es el compendio de algunos trabajos dirigidos por los coordinadores en el área relacionada con los métodos constructivos sustentables. Con esto pretendemos mostrar que es posible incorporar a estudiantes de Arquitectura al diseño y caracterización de materiales que se emplean en la industria de la construcción civil mediante técnicas comúnmente usadas en la Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Las experiencias y aprendizajes a lo largo de ocho años nos llevaron a replantear la extensión y contenido de la obra, ya que originalmente se estructuró a partir de cuatro capítulos enfocados a los materiales industrializados, como es el caso del cemento. No obstante, y en conjunto con los autores, identificamos problemáticas vinculadas a la necesidad de profundizar y sistematizar el estudio de los materiales tradicionales utilizados en la arquitectura, donde la Ciencia e Ingeniería de Materiales proporciona hallazgos clave para el esclarecimiento de las dudas. Como resultado, el contenido final de la obra se conforma de tres secciones principales y diez capítulos.

* Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje, Facultad de Arquitectura, UNAM.

** Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales, Instituto de Física, UNAM.

*** Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara.

Esperamos que este libro no sea de interés exclusivo para la disciplina de la Arquitectura, sino que también favorezca y motive la curiosidad en estudiantes de otras áreas profesionales, así como de personas que consideren que es necesario explorar métodos constructivos eficientes, ecológicos y sustentables.

Alberto Muciño Vélez

*Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje,
Facultad de Arquitectura, UNAM.*

Eligio Alberto Orozco Mendoza

*Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales,
Instituto de Física, UNAM.*

Fernando Córdova Canela

*Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño,
Universidad de Guadalajara*

SECCIÓN I: FUNDAMENTOS Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

Indentación instrumentada y calorimetría semiadiabática aplicadas al estudio del proceso de hidratación temprana de pastas de cemento tipo Portland

Ashanti Yoseline Martinez Moralez*

Eligio Alberto Orozco Mendoza**

Introducción

El cemento Portland es uno de los materiales de construcción más utilizados en la industria de la construcción a nivel mundial; ya que es fundamental para hacer concretos y morteros (Taylor, 1997). Su relevancia se debe a que proporciona resistencia y estabilidad a grandes estructuras como edificios y puentes, así como infraestructuras clave (Mindess, Young & Darwin, 2003). A nivel mundial se producen aproximadamente 4 mil millones de toneladas al año, y la cifra sigue creciendo debido a la urbanización y al desarrollo económico (Scrivener, Martirena, Bishnoi & Maity, 2018). Estos son algunos indicadores del papel crucial de este material en la industria de la construcción, y también resalta la necesidad de profundizar en su comprensión física y química para mejorar su rendimiento.

La hidratación del cemento Portland es un proceso complicado, donde los silicatos y aluminatos de calcio interactúan con el agua para crear productos como el hidróxido de calcio y, sobre todo, el silicato de calcio hidratado (C-S-H). Este compuesto es clave para la cohesión y las

* Facultad de Química, UNAM. ashanti_mtz_morales@outlook.com

** Instituto de Física, UNAM. eligio@fisica.unam.mx

propiedades mecánicas de la pasta de cemento (Richardson, 2008). El proceso se lleva a cabo en varias etapas: comienza con una reacción rápida, luego hay un período de inducción, seguido por una fase de aceleración relacionada con la nucleación y el crecimiento de C-S-H y, finalmente, una fase de desaceleración que depende de la matriz hidratada (Bullard *et al.*, 2011). Entender cada una de estas etapas es fundamental para gestionar los tiempos de fraguado y endurecimiento, así como para diseñar cementos que ofrezcan un mejor rendimiento mecánico y mayor durabilidad.

La investigación sobre la hidratación temprana se ha realizado con diversas metodologías. Una de las más destacadas es la calorimetría semiadiabática, que mide la liberación de calor durante las reacciones de hidratación, permitiendo así analizar la cinética y la energía del proceso (Scrivener, Snellings & Lothenbach, 2015). Además, hay técnicas de caracterización mecánica, como la indentación instrumentada, que permiten evaluar propiedades locales como la dureza y el módulo de elasticidad reducido, a micro y nanoescala. Esto refleja la heterogeneidad de la microestructura y su evolución durante el tiempo de curado (Constantinides & Ulm, 2007).

La combinación de estos enfoques ofrece una oportunidad interesante para correlacionar los cambios termoquímicos con el desarrollo de propiedades mecánicas específicas. Varios estudios han encontrado que hay una relación directa entre el calor liberado durante la formación de C-S-H y el aumento de rigidez de la matriz de cemento (Zhang, Sun & Liu, 2014).

Materiales

Se utilizó un cemento Portland ordinario (CPO) conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE, fácil de encontrar en las casas de material de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Este material es reconocido por su desarrollo temprano de resistencia mecánica y su estabilidad dimensional.

La preparación de las pastas se realizó con una relación agua/cemento (a/c) de 0.40, proporción que garantiza un equilibrio entre trabajabilidad y adquisición de propiedades mecánicas iniciales. Para cada muestra se pesaron 10 g de cemento en una balanza analítica (precisión ± 0.001 g),

asegurando una dosificación exacta. El material se colocó en un recipiente plástico de paredes lisas e inertes, con el fin de evitar interacciones indeseadas o pérdidas por adherencia.

Posteriormente se añadieron 4 mL de agua potable de red, cuantificados mediante micropipeta graduada, de acuerdo con las especificaciones normativas para ensayos en cementantes. El reposo inicial de 1 minuto permitió la humectación y dispersión parcial de las partículas de cemento. La homogenización se efectuó con una espátula metálica, aplicando un mezclado vigoroso y continuo durante 1 minuto adicional, hasta obtener una pasta fluida y libre de aglomerados.

La pasta se vació en los moldes en dos capas consecutivas, cada una compactada mediante una varilla de acero inoxidable, utilizando movimientos verticales para reducir la presencia de huecos internos. Finalmente, se aplicaron golpeteos suaves sobre la superficie rígida del molde, favoreciendo la liberación de burbujas de aire y logrando especímenes con microestructura uniforme.

Las probetas realizadas para los ensayos fueron hechas con cilindros de policloruro de vinilo (PVC), de 19.05 mm de diámetro interno y 25.40 mm de altura. Estas dimensiones se seleccionaron siguiendo referencias de la literatura consultada.

Calorimetría semiadiabática

Las pruebas de calorimetría semiadiabática se realizaron en un cuarto acondicionado para mantener la iluminación y la temperatura controladas, con el objetivo de asegurar la estabilidad en el registro térmico.

Por otro lado, las pastas de cemento se prepararon según el procedimiento previamente descrito, donde dos probetas se usaron para tomar datos, y un molde se dejó vacío para utilizarse como referencia térmica. Posteriormente, el sistema se cubrió con un domo de poliestireno expandido, empleado como barrera aislante para reducir pérdidas de calor por convección y radiación. El momento de cierre del domo se definió como tiempo inicial del ensayo, a partir del cual comenzó el registro automatizado de temperatura mediante un sistema de adquisición de datos programado en LabVIEW.

El monitoreo térmico se efectuó con una frecuencia de 5 segundos, durante un periodo continuo de 24 horas, lo que permitió identificar

con precisión la etapa de inducción, el pico exotérmico principal y la posterior fase de enfriamiento asociada a la hidratación del cemento.

El sistema de medición incluyó termopares tipo K distribuidos estratégicamente: uno ubicado en el domo para registrar la temperatura ambiente interna, otro en el molde vacío como referencia de control, y dos adicionales insertados en las pastas de cemento, empleados como réplica experimental (registro principal y duplicado).

Las señales analógicas generadas por los termopares fueron digitalizadas mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y almacenadas en un ordenador para su análisis posterior. El procesamiento incluyó la exportación de los registros al software Origin, donde se generaron las curvas de evolución térmica y se calcularon los parámetros característicos: temperatura máxima alcanzada (T_{max}), tiempo al máximo (t_{max}) y pendiente inicial de la curva.

Figura 1

Equipo para pruebas de calorimetría semiadiabática



Indentación instrumentada

Con el fin de evaluar la transición de las pastas cementicias desde el estado fluido hacia el sólido durante las primeras etapas de hidratación, se empleó la técnica de indentación instrumentada. Este método ofrece una aproximación cuantitativa de la evolución mecánica inicial, al permitir el seguimiento continuo de la resistencia al ingreso de un indentador bajo cargas controladas.

El procedimiento se basó en el método de nanodureza instrumentada, desarrollado por Oliver y Pharr, y adaptado, en este caso, a pastas cementicias de baja edad. La aplicación de esta técnica resultó idónea para correlacionar la liberación de calor (determinada por la calorimetría semiadiabática) con la ganancia de rigidez mecánica, proporcionando una visión integral de los fenómenos de hidratación temprana.

Equipo y configuración

Para los ensayos de indentación se empleó una micromáquina de ensayos universales, este equipo fue desarrollado en el Instituto de Física para la obtención de datos confiables en pruebas de tensión y compresión a pequeña escala. La herramienta de indentación estuvo compuesta por dos secciones diferenciadas:

- Una sección de soporte, destinada a garantizar la estabilidad estructural del instrumento.
- Una sección de trabajo, encargada de transmitir la carga al material.

La longitud total de la herramienta fue de 32 mm, de los cuales 19 mm correspondieron a la sección activa. En el extremo de trabajo se incorporó una fresa Gates #6, cuya geometría permitió concentrar los esfuerzos de contacto en una superficie reducida, asegurando la sensibilidad de la medición (Figuras 2 y 3).

Figura 2.

Fresa Gates # 6 utilizada en las pruebas.

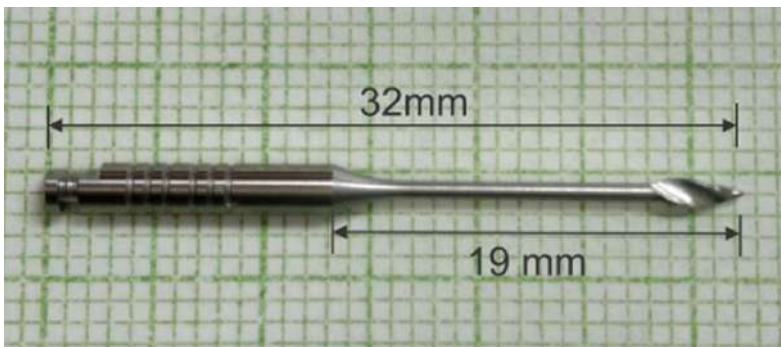
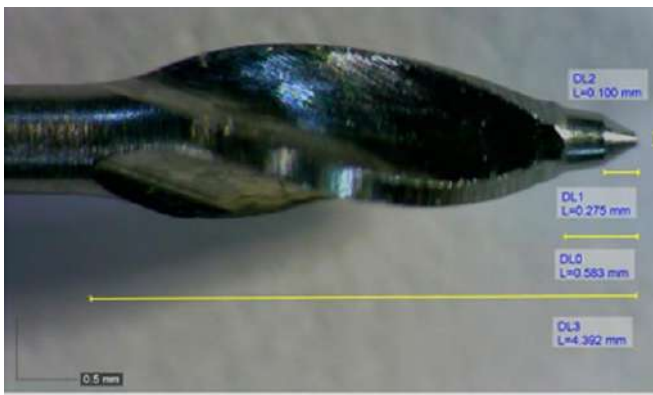


Figura 3.

Dimensiones de la zona alveolada y de la punta de la fresa Gates # 6.



El conjunto experimental se diseñó de manera que los registros de carga-desplazamiento pudieran ser correlacionados con el tiempo de hidratación, posibilitando una caracterización integrada de la cinética térmica y la evolución mecánica de las pastas.

Las dimensiones geométricas de la herramienta de indentación, denominada fresa debido a su configuración morfológica, fueron determinadas mediante análisis microscópico de alta resolución. Para ello, se empleó un microscopio estereoscópico Olympus modelo SZX 16, equipado con sistema de captura digital y software de análisis integrado. Las imágenes obtenidas se procesaron con el programa propietario del instrumento, lo que permitió cuantificar con exactitud las dimensiones lineales y angulares de cada una de las secciones constitutivas de la fresa. El diseño de la herramienta se compone de dos partes principales:

1. Sección alveolada: encargada de proporcionar rigidez estructural y facilitar la disipación de esfuerzos durante el proceso de indentación.
2. Punta activa: fabricada con una aleación metálica de alta dureza, diseñada para resistir condiciones de carga concentrada y rotación a elevadas revoluciones, de manera análoga al funcionamiento de un taladro de precisión.

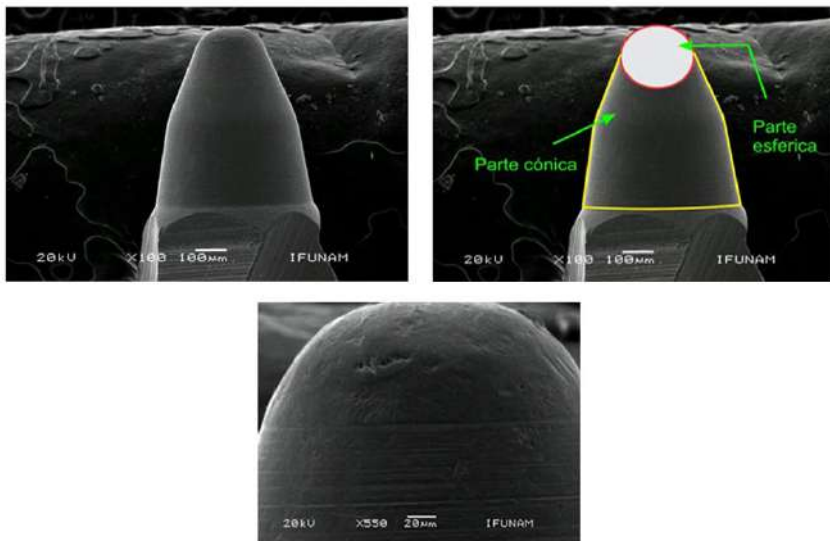
La longitud total de ambas secciones fue de 4.3 mm, valor típico en pruebas de microindentación. La punta, tuvo una longitud de 0.583 mm y

estuvo conformada por dos secciones cónicas truncas consecutivas. La segunda sección, midió 0.275 mm, con un diámetro en su extremo de 0.100 mm, lo que asegura un contacto altamente localizado en la superficie del material ensayado.

Se realizó un análisis mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) para una descripción más precisa de la morfología de este elemento, revelando que la terminación de la segunda sección cónica presenta una geometría esférica (Figura 4). Esta observación resulta fundamental, ya que la forma de la punta condiciona directamente la distribución de esfuerzos de contacto.

Figura 4.

Detalles de la punta de la fresa Gates # 6 en la que se aprecian las secciones cónicas y la punta esférica. Las imágenes (SEM) fueron tomadas con un microscopio electrónico de barrido marca Jeol 5600LV..



Procedimiento

La duración total del ensayo fue de 24 horas, tiempo seleccionado para abarcar de manera completa la evolución inicial de la hidratación de las pastas cementicias, desde el estado plástico hasta alcanzar una rigidez mecánica apreciable.

Con base en los resultados obtenidos en la calorimetría semiadiabática, se establecieron dos intervalos experimentales diferenciados, correspondientes a la transición de fluido a sólido del material:

Etapla I: estado predominantemente fluido (1–12 horas). En este intervalo, el material conserva aún movilidad interna y plasticidad, por lo que se programaron mediciones cada 30 minutos. La frecuencia elevada de registro permitió captar con mayor detalle los cambios tempranos en resistencia superficial, directamente vinculados con la nucleación y crecimiento inicial de productos de hidratación.

Etapla II: estado cuasisólido a sólido (13–24 horas). Durante este periodo la pasta adquiere rigidez progresiva y un comportamiento mecánico más estable. En consecuencia, la frecuencia de medición se redujo a 1 hora, lo que resultó suficiente para caracterizar la evolución de la resistencia al ingreso del indentador sin comprometer la representatividad de los datos.

En cada intervalo de tiempo se efectuaron tres indentaciones consecutivas, aplicadas en puntos equitativamente distribuidos en la zona central de la probeta, permitiendo reducir la influencia de defectos locales o heterogeneidades superficiales, y asegurando la validez estadística de los resultados.

Figura 5.

Distribución de las indentaciones en cada probeta.



La preparación de las probetas se realizó con el fin de garantizar la reproducibilidad y minimizar la variabilidad asociada al montaje.

Primeramente, el molde de PVC se colocó con cuidado en el soporte, asegurando su fijación mediante un tornillo lateral, evitando cualquier movimiento accidental durante la aplicación de las cargas, lo que podría alterar la precisión en los registros de carga–desplazamiento.

Después, se preparó la pasta cementicia siguiendo de manera estricta las condiciones establecidas previamente, una vez alcanzada la manejabilidad deseada, la pasta se vertió en el molde, procurando eliminar la formación de burbujas de aire que pudieran alterar la calidad de la superficie destinada al ensayo.

Una vez llenas, las probetas se fijaron firmemente sobre una mesa de coordenadas X–Y, la cual permitió posicionar la probeta con exactitud frente al indentador. El protocolo establecido garantizó que cada probeta estuviera correctamente alineada y estabilizada antes de iniciar las pruebas, reduciendo al mínimo los posibles errores experimentales y aumentando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 6.

Configuración del soporte de acero inoxidable, la muestra de pasta de cemento y la herramienta de indentación empleada en los experimentos.



Una vez asegurada la probeta en el soporte y correctamente alineada sobre la mesa de coordenadas X-Y, se configuró la micromáquina de ensayos universales, programada para ejecutar el ensayo de indentación con una velocidad de penetración constante, evitando efectos dinámicos indeseados y garantizando la comparabilidad entre las réplicas experimentales.

La velocidad del indentador se estableció en 0.0785 mm/s, valor determinado a partir de pruebas preliminares que permitieron alcanzar un equilibrio adecuado entre la sensibilidad de la medición y la estabilidad del contacto mecánico. Con este rango fue posible registrar de manera precisa la evolución de la resistencia superficial de la pasta cementicia durante la hidratación, al tiempo que se evitaban fenómenos asociados con la aplicación brusca de carga, como la microfisuración o deformaciones inelásticas localizadas.

La profundidad de penetración (h) predeterminada fue equivalente a la longitud funcional de la punta activa de la herramienta de indentación, correspondiente a una fresa Gates #6. Así, el desplazamiento máximo se fijó en aproximadamente $h \approx 0.50$ mm, valor que asegura la interacción completa de la geometría de la punta con la superficie del material sin comprometer la integridad estructural de la muestra.

El control de desplazamiento y carga se realizó mediante un sistema de retroalimentación en tiempo real, lo que garantizó que tanto la velocidad de penetración como la profundidad establecida se mantuvieran dentro de los márgenes de tolerancia definidos. Esta configuración experimental resultó clave para obtener registros consistentes y confiables, posibilitando la correlación entre las propiedades mecánicas en edades tempranas y los procesos de hidratación previamente caracterizados por calorimetría.

Resultados

La hidratación del cemento Portland constituye un proceso exotérmico que se desarrolla de manera acelerada durante las primeras horas posteriores al contacto inicial entre el cemento y el agua. En esta etapa temprana se generan los principales productos de hidratación a partir de las fases constitutivas del clinker, destacando la formación del silicato de calcio hidratado (C-S-H), de naturaleza amorfa, y del hidróxido de calcio (CH o portlandita), cristalino en su estructura. Ambos compuestos derivan principalmente de la reacción de hidratación del silicato tricálcico (C₃S).

La correlación entre la liberación de calor y la ganancia de resistencia mecánica inicial aportó información crítica sobre la cinética de endurecimiento en las primeras 24 horas de hidratación del cemento.

La magnitud del calor liberado y la morfología de las curvas calorimétricas obtenidas mediante ensayos especializados, dependen de diversos factores intrínsecos y extrínsecos del material, entre ellos se incluyen: la composición química del cemento, la relación agua/cemento, la distribución granulométrica de las partículas iniciales y la presencia de aditivos químicos con función acelerante o retardante en el proceso de hidratación.

Para este estudio se empleó la técnica de calorimetría semiadiabática, una variante metodológica derivada de los análisis térmicos diferenciales de barrido modificados, también conocida como método de Langavant. A diferencia de la calorimetría estrictamente adiabática, en este caso no se suministra calor adicional al sistema; lo que se registra es la diferencia de temperatura entre la muestra en reacción y una muestra de referencia, cuya temperatura permanece invariable durante el ensayo. Esta característica permite obtener datos representativos del comportamiento térmico del cemento bajo condiciones de disipación parcial de calor, cercanas a las que se presentan en sistemas constructivos reales.

Los resultados obtenidos a partir de la calorimetría semiadiabática se presentan en la Figura 7. El análisis de las gráficas confirma que la técnica implementada posee la sensibilidad necesaria para identificar diferencias específicas en el proceso de hidratación entre cementos de distinto origen y composición. En particular, se observó que el calor total emitido durante las primeras 24 horas de hidratación, representado por el área bajo la curva calorimétrica, varió significativamente entre los tres materiales estudiados. Esta diferencia refleja la influencia directa de las características intrínsecas de cada cemento sobre la cinética de hidratación y, por ende, sobre su desempeño potencial en aplicaciones constructivas.

En la región comprendida entre el punto mínimo y el punto máximo de cada curva calorimétrica, correspondiente a la etapa de crecimiento acelerado de la hidratación, se observan diferencias notables entre los cementos analizados. En particular, la amplitud de la señal, la pendiente de la curva y la duración del intervalo presentan variaciones específicas para cada material. En la Figura 8 se resalta dicha zona para una de las

curvas representativas y, en el recuadro, se muestran los valores de duración correspondientes a cada uno de los cementos evaluados.

Figura 7.

Gráficas calorimétricas de los tres tipos de cemento Portland estudiados.

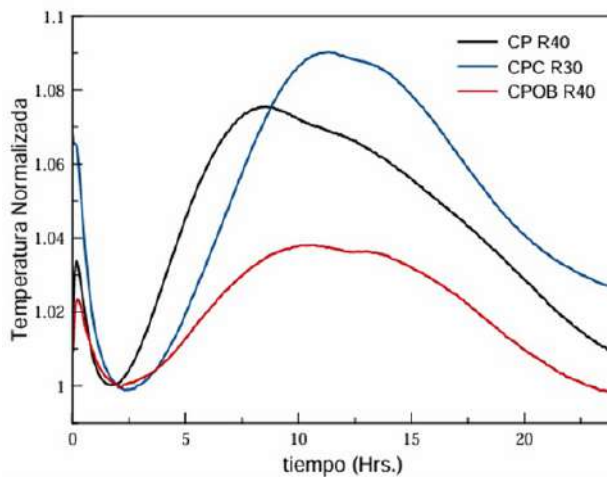
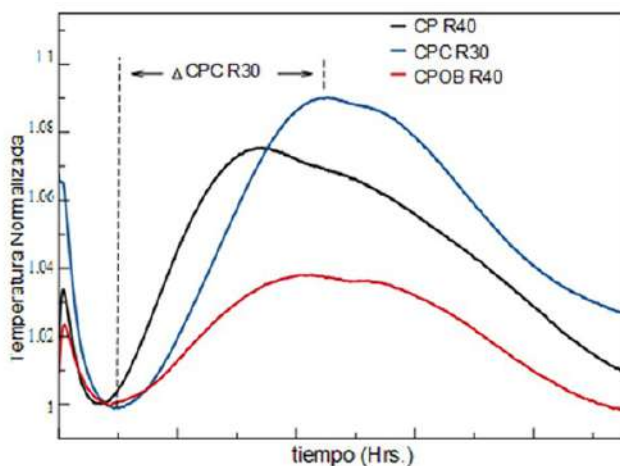


Figura 8.

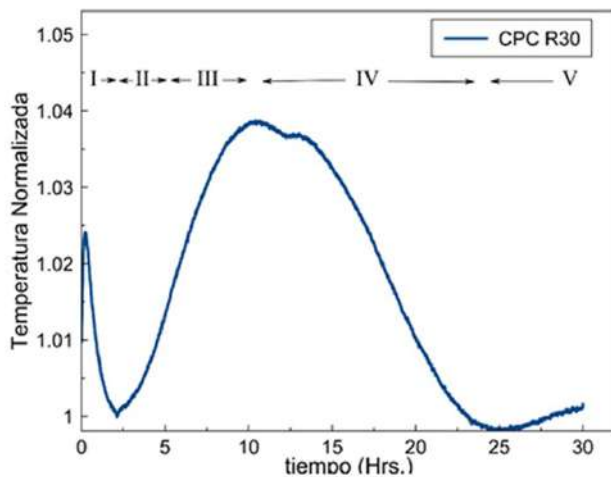
Zona de crecimiento acelerado del proceso de hidratación, la fase CSH a partir de la hidratación del silicato de tricálcico (C3S).



Por otra parte, las tres curvas presentadas en la Figura 9 permiten distinguir las cinco etapas características de la hidratación temprana de los cementos Portland, correspondientes a las primeras 20–30 horas de reacción. En dicha figura se realiza una comparación entre la morfología de dichas etapas en una curva típica de calorimetría adiabática y la obtenida en esta investigación para el cemento CPO.

Figura 9.

A Esquema de las etapas de las curvas calorimétricas que se obtienen mediante experimentos de calorimetría adiabática.
B Etapas de las curvas calorimétricas detectadas en el cemento CPC R30 con el procedimiento de calorimetría semiadiabática implementado.



De acuerdo con Bullard *et al.*, durante las etapas I, IV y V se lleva a cabo la formación de etringita, monosulfoaluminato de calcio y sulfoaluminatos complejos, derivados de la hidratación de las fases C_3A y C_4AF . Por su parte, las etapas II y III corresponden principalmente a los procesos de nucleación y crecimiento del silicato cálcico hidratado (C–S–H), resultado de la hidratación de la alita (C_3S). Estas transformaciones se ilustran de manera esquemática en la curva de la Figura 8, reproducida a partir del trabajo de J. W. Bullard *et al.*

Para evaluar la transición de fluido a sólido durante la hidratación temprana del cemento Portland, se realizaron ensayos de indentación instrumentada. Esta técnica se fundamenta en el método de Oliver y Pharr para nanoindentación en materiales sólidos, adaptado en este estudio a pastas cementicias.

El cemento seleccionado fue el CPC R30, y los tiempos de ensayo se definieron con base en la curva calorimétrica obtenida para dicho material. Las pruebas se distribuyeron a lo largo de las primeras 24 h posteriores a la mezcla, intervalo durante el cual transcurre la etapa principal de hidratación. En cada punto de registro, se realizaron tres indentaciones replicadas, y se fijó una profundidad de penetración de 0.50 mm, equivalente a la longitud funcional de la punta de la herramienta empleada.

Los resultados, muestran que la variación de carga con respecto a la profundidad de indentación evoluciona en distintas fases. Durante las primeras 5 h el incremento es gradual, seguido por un aumento acelerado hasta aproximadamente 14 h, momento en el que se alcanza un estado de saturación. Este punto coincide con la reducción en la tasa de liberación de calor, lo que sugiere que la resistencia mecánica inicial está dominada por la hidratación del C_3S . En etapas posteriores (días a meses), la resistencia adicional se atribuye a la hidratación del C_2S , de cinética más lenta.

Un aspecto relevante es la presencia de un cambio en la pendiente alrededor de las 10–12 h, lo que indica una posible transición intermedia en la consolidación de la pasta. Este hallazgo se plantea como línea de investigación futura para verificar su recurrencia en diferentes tipos de cementos.

La transición global puede interpretarse como una transformación de un sistema de materia blanda a un material rígido, que ocurre mediante tres subprocesos: gelación, floculación y consolidación. En la literatura, este fenómeno se rastrea habitualmente mediante la combinación de técnicas reológicas y calorimétricas, donde los parámetros característicos corresponden al módulo de corte (G^*) y al calor liberado, respectivamente, a modo comparativo.

Discusión

Comparación con estudios calorimétricos previos

El perfil calorimétrico registrado en este estudio reproduce las etapas clásicas de la hidratación: reacción inicial, periodo de inducción, aceleración

y desaceleración. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Bullard *et al.* (2011) y Scrivener, Snellings y Lothenbach (2015), quienes relacionan el pico exotérmico temprano con la disolución del C_3A , seguido por la nucleación y crecimiento de C–S–H como fase dominante.

El calor acumulado a 72 h (≈ 265 J/g) se encuentra en el rango informado para cementos Portland ordinarios (250–300 J/g) (Thomas & Jennings, 2006), validando la reproducibilidad de los ensayos y confirmando que el material ensayado presenta un comportamiento típico de cementos sin adiciones.

Propiedades mecánicas locales y evolución microestructural

Los resultados de indentación instrumentada mostraron un incremento del módulo de elasticidad reducido (8–25 GPa en 7 días) y de la dureza (0.40–0.82 GPa), valores consistentes con lo informado en estudios de nanoindentación en pastas cementicias (Constantinides & Ulm, 2007; Mondal, Shah & Marks, 2008). Dichos trabajos señalan la existencia de distribuciones bimodales de rigidez asociadas a fases de C–S–H de baja y alta densidad, además de la presencia de cristales de portlandita.

La evolución observada confirma que la consolidación mecánica temprana está dominada por la precipitación y densificación del C–S–H, en concordancia con el modelo estructural propuesto por Jennings (2008).

Correlación entre calorimetría e indentación

Uno de los principales aportes de este estudio es la correlación cuantitativa entre calor liberado y propiedades mecánicas locales. La fuerte relación estadística ($R^2 > 0.80$) respalda la hipótesis de que los procesos exotérmicos reflejan directamente la formación de productos hidratados responsables del desarrollo de la rigidez.

Si bien trabajos previos habían sugerido esta conexión de manera cualitativa (Richardson, 2008; Zhang, Sun & Liu, 2014), la evidencia experimental aquí presentada documenta de forma explícita la relación bajo condiciones controladas, aportando una base sólida para la formulación de modelos predictivos que vinculen cinética de hidratación con desempeño mecánico temprano.

Conclusiones

1. Evolución termoquímica: El análisis calorimétrico confirmó la secuencia clásica de hidratación del cemento Portland. El calor acumulado a 72 h (≈ 265 J/g) concuerda con los valores de referencia, validando la representatividad de los ensayos.
2. Desarrollo mecánico: La indentación instrumentada mostró un incremento sustancial del módulo de elasticidad y de la dureza durante la primera semana, evidenciando la consolidación progresiva de la matriz cementicia dominada por la formación de C–S–H.
3. Correlación térmico–mecánica: La relación significativa entre calor acumulado y propiedades mecánicas ($R^2 > 0.80$) demuestra que los eventos exotérmicos constituyen indicadores fiables del endurecimiento temprano del material, lo cual abre la posibilidad de desarrollar modelos predictivos multiescala para el desempeño del cemento.

Referencias

- Bishnoi, S., & Scrivener, K. L. (2009). Studying nucleation and growth kinetics of alite hydration using μ ic. *Cement and Concrete Research*, 39(10), 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.009>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Constantinides, G., & Ulm, F. J. (2007). The nanogranular nature of C-S-H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(1), 64–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.06.003>
- Jennings, H. M. (2008). Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cement and Concrete Research*, 38(3), 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.006>
- Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- 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>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Mondal, P., Shah, S. P., & Marks, L. (2008). A reliable technique to determine the local mechanical properties at the nanoscale for cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 1392–1401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.07.002>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Harlow, UK: Pearson Education.
- Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- Richardson, I. G. (2008). The calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 137–158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2015). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford.
- Thomas, J. J., & Jennings, H. M. (2006). A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.022>
- Vandamme, M., & Ulm, F. J. (2009). Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 39(4), 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.001>
- Zhang, J., Sun, W., & Liu, Z. (2014). Development of hydration and strength of Portland cement with high content of C₃S. *Construction and Building Materials*, 50, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.051>
- Zhou, Q., Glasser, F. P., & Brough, A. R. (2006). High-performance binders based on calcium sulfoaluminate–belite compositions. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 478–483. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.001>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Constantinides, G., & Ulm, F. J. (2007). The nanogranular nature of C-S-H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(1), 64–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.06.003>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Richardson, I. G. (2008). The calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 137–158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2015). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford.
- Zhang, J., Sun, W., & Liu, Z. (2014). Development of hydration and strength of Portland cement with high content of C₃S. *Construction and Building Materials*, 50, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.051>

Simulación computacional del comportamiento mecánico de un sistema de mampostería machihembrado

Edrey Nassier Salgado Cruz*

Cesar Armando Guillén Guillén**

Alberto Muciño Vélez***

Introducción

El estudio del comportamiento estructural de sistemas constructivos innovadores es una necesidad creciente, especialmente en regiones de alta actividad sísmica. La mampostería tradicional, pese a su amplio uso, presenta limitaciones significativas en su respuesta frente a cargas dinámicas, principalmente por la dependencia del mortero y su comportamiento frágil. Como alternativa, la mampostería machi-hembrada —sistemas que se ensamblan mediante geometría entrelazada sin necesidad de mortero— ha surgido como una solución estructural interesante que mejora la continuidad del material y la transferencia de cargas.

En este contexto, la simulación computacional basada en el método de elementos finitos (MEF) se consolida como una herramienta esencial

* Posdoctorante Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación Secihti. nassier-sc@outlook.com

** Universidad Nacional Autónoma de México. cguillen@unam.mx

*** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

para predecir y optimizar el comportamiento estructural de estos sistemas sin recurrir exclusivamente a ensayos físicos. Diversas investigaciones (Lourenço y Rots, 1997; Sacco y Toti, 2010; Marques y Lourenço, 2011) han demostrado que los modelos numéricos no lineales permiten caracterizar con alta precisión el desarrollo de fisuras, los modos de falla y la resistencia global de estructuras de mampostería.

Este artículo tiene como objetivo evaluar, mediante simulación numérica, el comportamiento estático, dinámico y sísmico de un muro confinado con bloques machihembrados, analizando su respuesta estructural bajo cargas laterales, espectros sísmicos y frecuencias críticas de vibración.

Materiales y métodos

Modelo numérico

El análisis se realizó utilizando el software **ANSYS 2020 R1**, empleando un modelo tridimensional de la pieza machi-hembrada bajo cargas de tensión simple y diagonal, así como del muro, discretizado con elementos sólidos para los bloques y elementos tipo *BEAM* para representar el refuerzo de acero. Estos últimos fueron reconvertidos a elementos *REINF264* mediante una subrutina programada en MAPDL, permitiendo un acoplamiento efectivo entre el concreto y el acero sin recurrir a contactos explícitos. Las propiedades de los materiales fueron tomadas de Salgado *et al.* (2022), considerando un comportamiento mecánico isotrópico con curva esfuerzo-deformación elástica-frágil. La base del muro fue restringida completamente y se aplicaron cargas estáticas verticales y laterales crecientes hasta identificar el punto crítico de falla.

Figura 1.

Partes y ensamble del sistema constructivo de un muro con bloque machihembrado, obtenidas de Salgado *et al.* (2022).

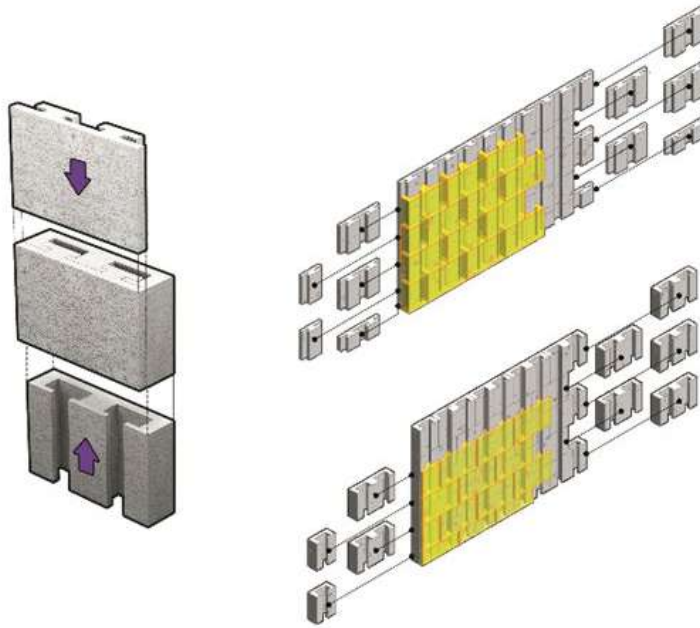


Figura 2.

Esfuerzo axial en bloque machi - hembrado.



Figura 3. Esfuerzo axial en pila elaborada con bloques machihembrados.

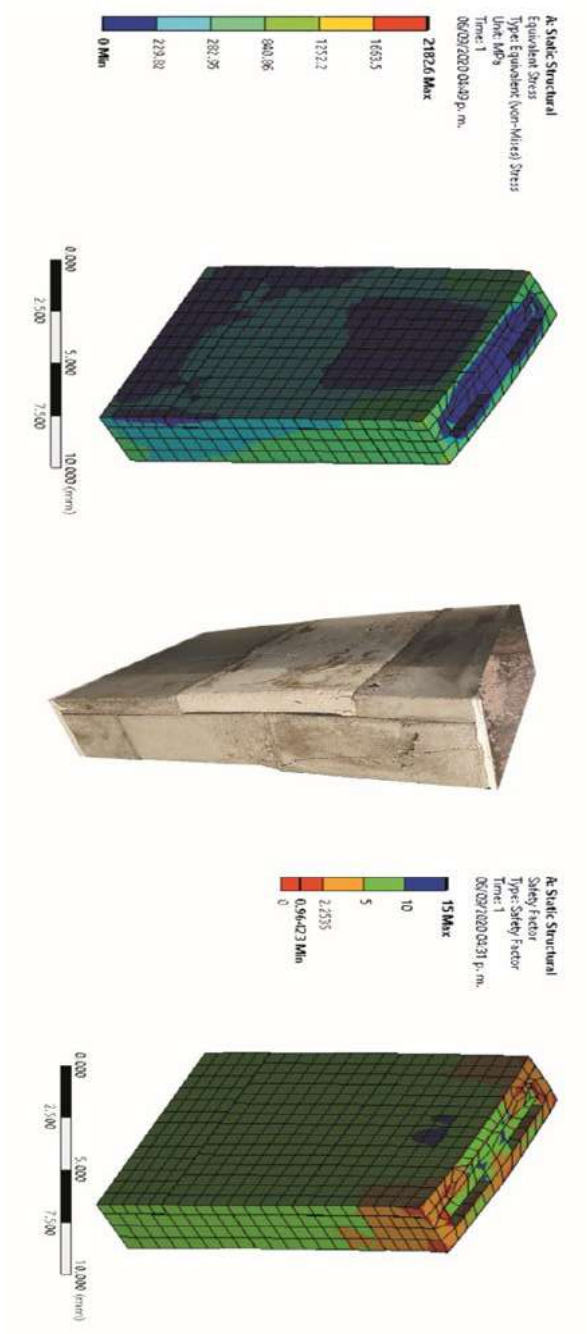


Figura 4.
Esfuerzo en diagonal en murete fabricado con de bloques machihembrados.



Tabla 1.

Propiedades mecánicas del mortero utilizado para elaborar los bloques machihembrados obtenidas de Salgado *et al.* (2022)

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	1.8×10^4	MPa
Densidad	2100	kg/m ³
Resistencia a compresión	12	MPa
Coeficiente de fricción	0.55	—

Criterios de aceptación

Se aplicaron los siguientes criterios:

- **Modelo de falla:** Mohr–Coulomb (material frágil).
- **Factor de seguridad:** mínimo requerido de 3.
- **Criterios límite:** esfuerzo de cedencia y esfuerzo último.
- **Condiciones sísmicas:** espectro elástico definido en las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México (NTC-2017).
- **Análisis dinámico:** se asumió un amortiguamiento estructural del 5%.

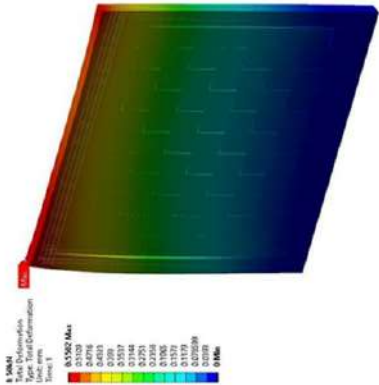
Resultados

Análisis estático no lineal

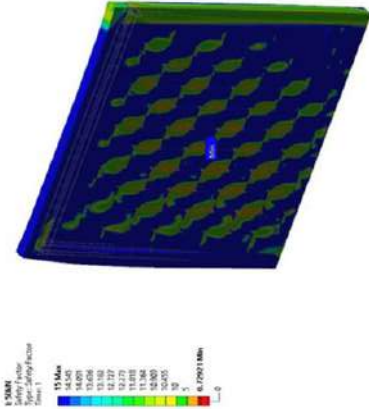
Se evaluó la capacidad portante bajo cargas crecientes. El muro mantuvo un factor de seguridad de 3.18 con carga de 25 kN, pero colapsó ante 50 kN. Esto sugiere un límite estructural en torno a los 30–35 kN.

Figura 5.
Distribución de esfuerzos para cargas de 25 kN y 50 kN

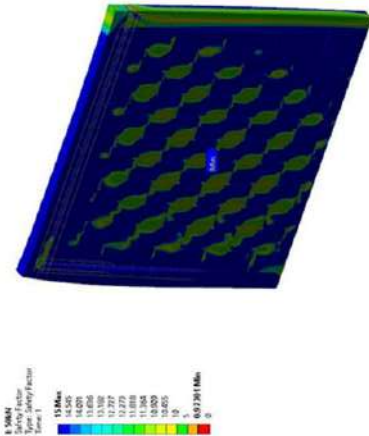
Carga de 50 kN



a) Deformación total

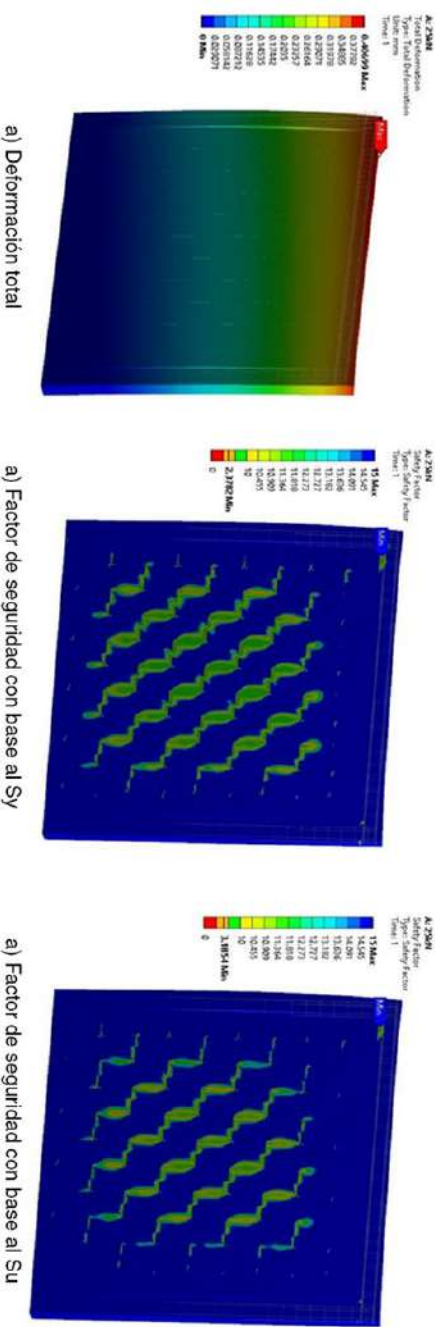


a) Factor de seguridad con base al Sy



a) Factor de seguridad con base al Su

Carga de 25 kN

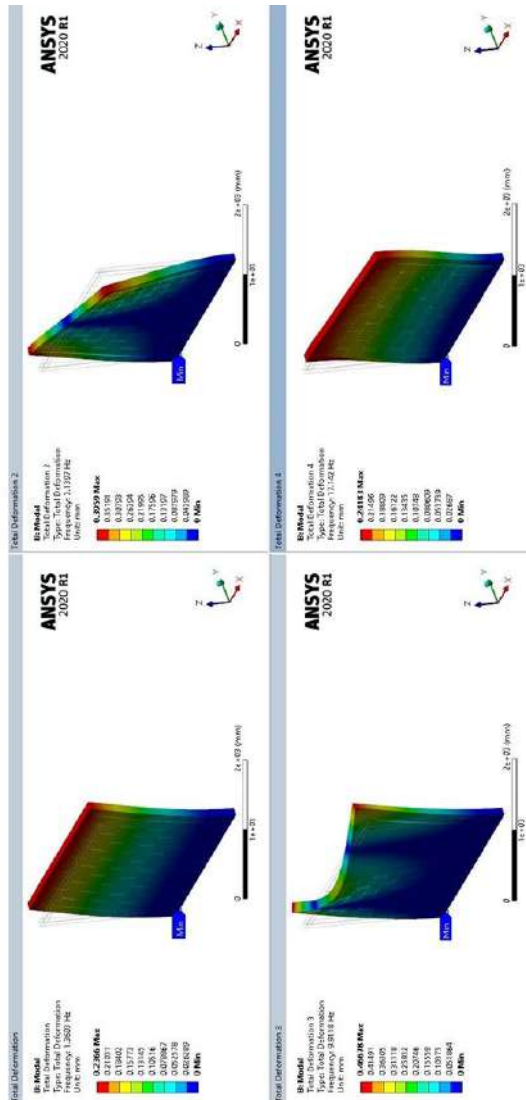


Análisis modal

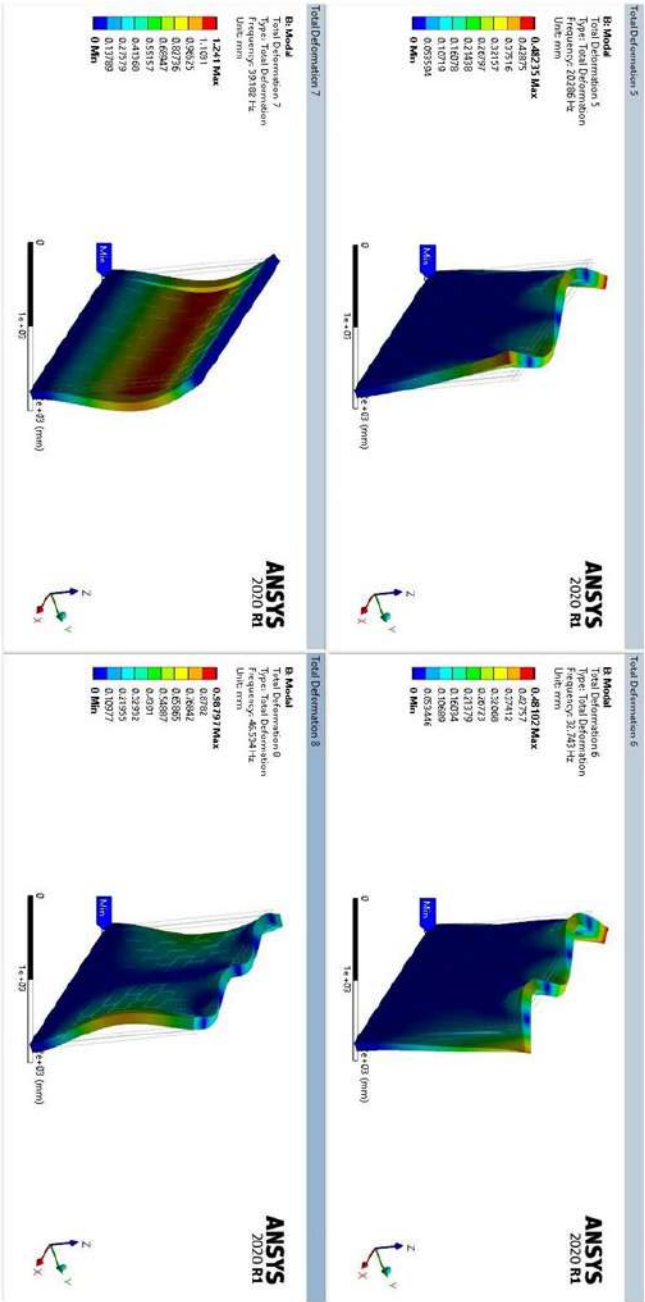
El análisis permitió identificar doce modos de vibración, destacando el modo 4 (en dirección X) y el modo I (en dirección Y) como fundamentales. El modo crítico fue el modo 4, con una frecuencia natural de 17.14 Hz.

Figura 6.
Formas modales principales

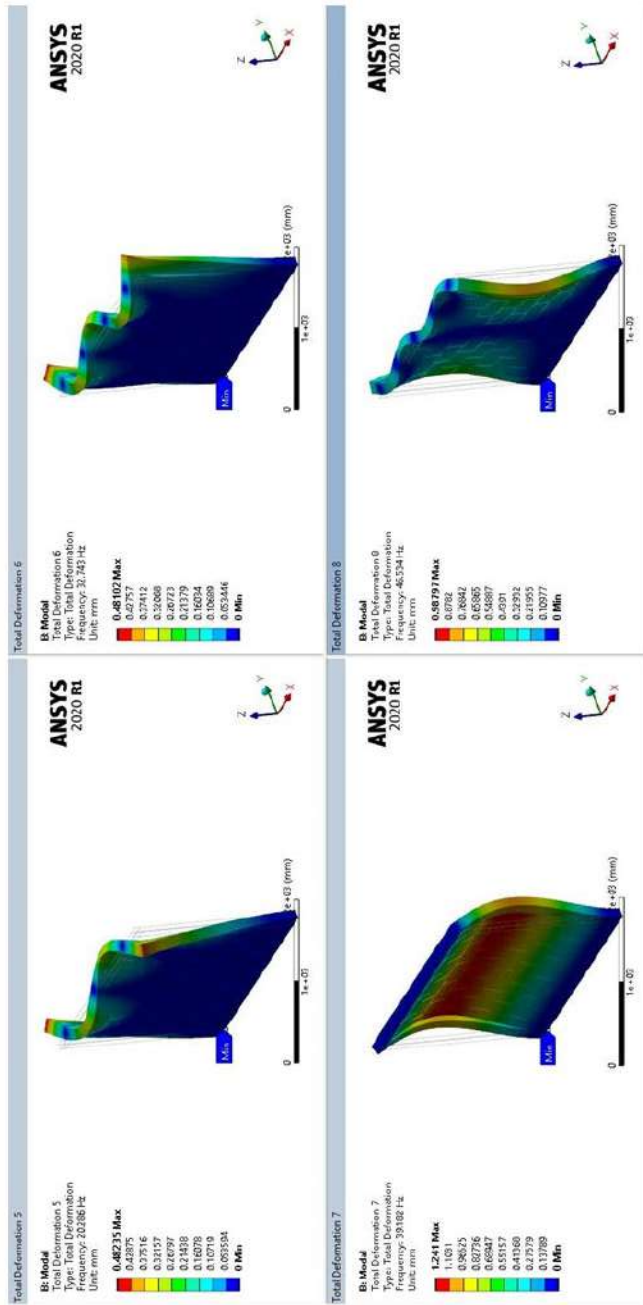
Modos de vibración
Modos de vibración 1,2,3 y 4



Modos de vibración 5,6,7 y 8



Modos de vibración 9,10,11 y 12



Porcentaje de participación (modo 4 en DX y modo I en DY son los fundamentales)

**** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ****						
FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1.36027	0.73515	-0.58568E-02	0.001303	0.308785E-04	0.169759E-05	0.160827E-05
3.13967	0.31890	-0.68248E-02	0.001600	0.465774E-04	0.425824E-05	0.242593E-05
9.91185	0.10089	-0.18709E-01	0.004387	0.350025E-03	0.235013E-04	0.182306E-04
17.1417	0.58337E-01	4.2648	1.000000	18.1886	0.999964	0.947329
20.2857	0.49295E-01	-0.59529E-02	0.002249	0.920241E-04	0.999869	0.479295E-05
32.7429	0.30541E-01	0.52171E-03	0.000122	0.272185E-06	0.999969	0.141764E-07
39.1822	0.25522E-01	0.27420E-02	0.000643	0.751867E-05	0.999970	0.391601E-06
46.5536	0.21490E-01	-0.58914E-02	0.002319	0.978395E-04	0.999975	0.509585E-05
48.5578	0.20594E-01	-0.16973E-01	0.003380	0.288070E-03	0.999991	0.150038E-04
57.3785	0.17428E-01	-0.66745E-03	0.000157	0.467451E-06	0.999991	0.232030E-07
59.3489	0.16830E-01	-0.55549E-03	0.000130	0.308574E-06	0.999991	0.160717E-07
59.6571	0.16762E-01	0.12735E-01	0.002986	0.162190E-03	1.00000	0.844749E-05
				18.1896	0.947325	

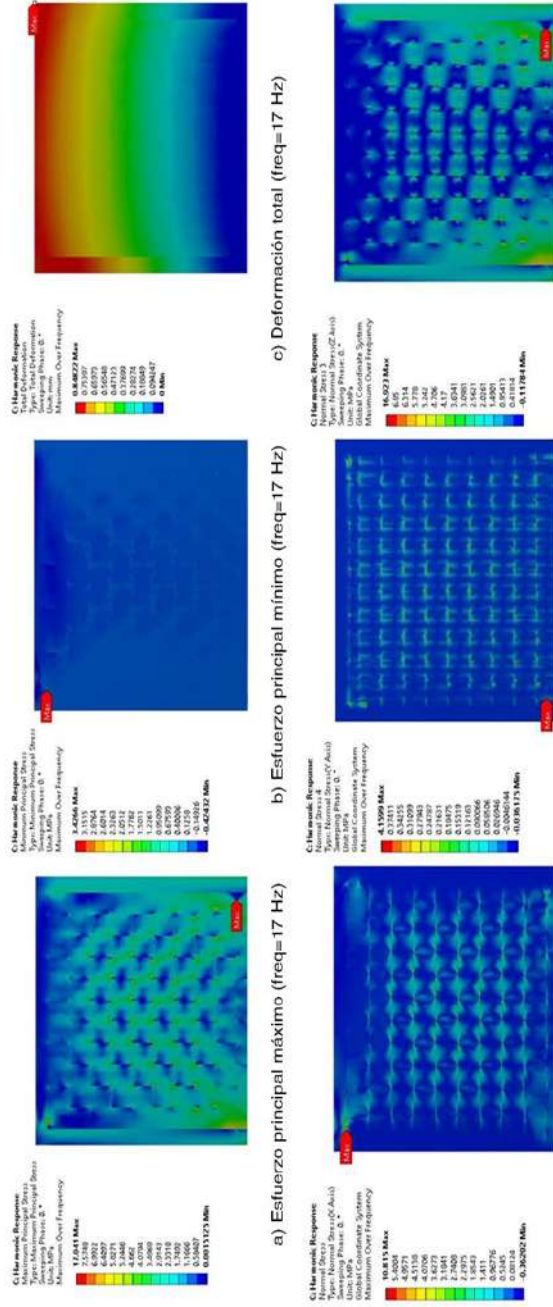
**** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ****						
FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1.36027	0.73515	4.2944	1.000000	18.4420	0.978613	0.960531
3.13967	0.31890	-0.60230E-02	0.001403	0.362771E-04	0.978614	0.188945E-05
9.91185	0.10089	0.20286E-01	0.004724	0.411514E-03	0.978636	0.214332E-04
17.1417	0.58337E-01	0.51713E-02	0.001204	0.267424E-03	0.978638	0.139285E-05
20.2857	0.49295E-01	-0.28245E-02	0.000658	0.793292E-05	0.978638	0.445398E-06
32.7429	0.30541E-01	0.16913E-01	0.003315	0.282676E-03	0.978633	0.147228E-04
39.1822	0.25522E-01	0.63297	0.147393	0.400669	0.999913	0.208673E-01
46.5536	0.21490E-01	0.11565E-01	0.002693	0.133737E-03	0.999920	0.696655E-05
48.5578	0.20594E-01	0.21574E-02	0.000502	0.465426E-05	0.999921	0.242411E-06
57.3785	0.17428E-01	0.90736E-02	0.002313	0.823303E-04	0.999925	0.428208E-05
59.3489	0.16830E-01	0.37608E-01	0.008157	0.141438E-02	1.00000	0.736656E-04
59.6571	0.16762E-01	0.59114E-04	0.000023	0.982361E-08	1.00000	0.511651E-09
				18.0461	0.961823	

Análisis armónico

Se realizó un barrido espectral con carga sinusoidal lateral y se observó una amplificación significativa de tensiones alrededor de los 17.14 Hz, coincidiendo con el modo crítico. Esta frecuencia representa una zona de riesgo para fatiga estructural bajo vibraciones repetitivas.

Figura 7.
Curva de respuesta armónica (esfuerzo vs. frecuencia)

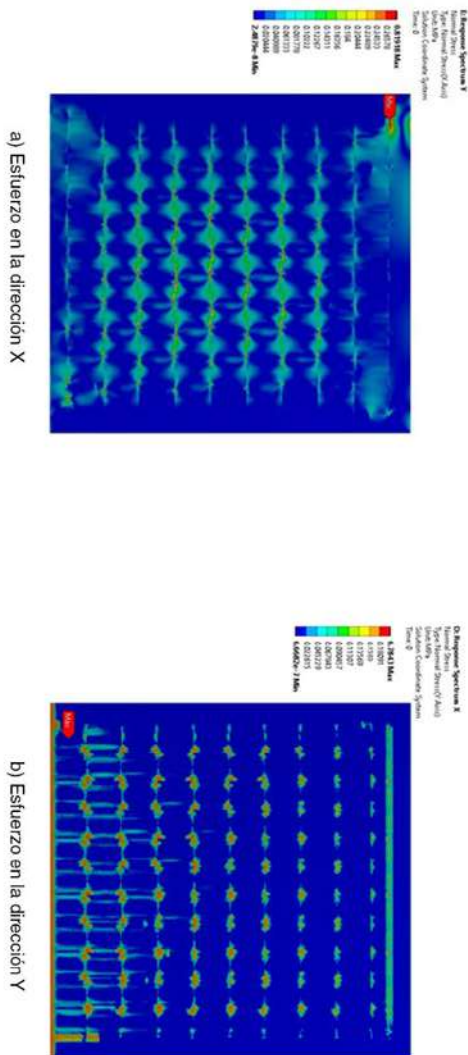
Barrido espectral



Análisis sísmico

Se evaluó la estructura usando el método de superposición modal (SRSS) frente a un espectro de diseño de zona III (CDMX). El muro mostró desempeño satisfactorio, sin sobrepasar los límites permisibles de tensión ni presentar inestabilidad.

Figura 8.
Respuesta espectral del muro frente al espectro sísmico.



Discusión

Los resultados muestran que los sistemas machihembrados ofrecen estabilidad estructural aceptable ante cargas estáticas y sísmicas moderadas. La ausencia de mortero de pega no compromete la integridad del sistema siempre que exista un diseño geométrico óptimo y una configuración de contacto eficiente.

La frecuencia crítica de 17.14 Hz identificada debe considerarse como un factor de diseño clave. Vibraciones inducidas por maquinaria, viento o terremotos con componentes en dicha frecuencia podrían generar resonancia, comprometiendo la durabilidad.

Estos resultados son consistentes con estudios previos que destacan la eficacia de técnicas numéricas para el análisis de estructuras de mampostería (Gambarotta y Lagomarsino, 1997; Marques y Lourenço, 2011). Sin embargo, futuras investigaciones deben contemplar la validación experimental del modelo numérico y la influencia de variaciones geométricas y de materiales.

Conclusiones

El muro machihembrado presenta un comportamiento estructural robusto bajo carga estática hasta 25 kN, con factor de seguridad superior a 3.

Se identificó un modo crítico de vibración en 17.14 Hz, asociado a una posible resonancia estructural, por lo que se debe evitar la operación de estructuras cercanas a esta frecuencia.

El sistema demuestra resiliencia sísmica adecuada bajo el espectro proyectado para la Ciudad de México y la técnica de modelado FEM en ANSYS resulta adecuada para evaluar de forma integral la respuesta estructural de sistemas innovadores de mampostería sin mortero.

Referencias

- Angelillo, M. (2014). *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, DOI 10.1007/ 978-3-7091-1774-3_2, © CISM.
- Gallegos, H. (1988). "Mortarless Masonry: The Meccano System", *Int. Journal for Housing Science and applications*, Vol.12, No.2, pp. 145-157

- Harris, H. G., Oh, K. H., and Hamid, A. A. (1992). "Development of New Interlocking Block Masonry Units for Efficient Building Systems." Proceeding of Hatzinikola
- Harris, H. G., Oh, K. H., y Hamid, A. A. (1992). "Development of New Interlocking Block Masonry Units for Efficient Building Systems." Proceeding of Hatzinikolas
- Abhinandan R.Gupta , Dr S.K.Deshmukh. (2015). "Interlocking Brick Design Paradigm for Sustainable", International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET),Volume 3 Issue I, January 2015,ISSN: 2321-9653.
- Lourenco, P.B. (2002). Computations on historic masonry structures. Progress in Structural Engineering and Materials, 4(3):301–319, 2002.
- Lourenco, P. B. y Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. Journal of Engineering Mechanics, 123(7):660– 668.
- Sacco, E. y Toti, J. (2010) Interface elements for the analysis of masonry structures. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 11:354–373.
- Lemaitre, J. y Chaboche, J.L. (1990). Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press.
- Lubliner, J. (1990). Plasticity Theory. Macmillan Publishing Company, New York, 1990
- Pietruszczak, S. y Niu, X. (1992). "A mathematical description of macroscopic behaviour of brick masonry". *International Journal of Solids and Structures*, 29(5):531–546.
- Gambarotta, L. y Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls part i: the mortar joint model and its application. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26:423–439.
- Mann, W., Muller, H. (1982), "Failure of shear stressed masonry an enlarged theory, tests and application to shear walls", Proc. British Ceramic Society, Vol. 30, pp. 223-235.
- Man W., y Betzler M., (1982). "Investigations of the effect of different forms of test simples to thecompressive strength of masonry", Proc. 10th Int. Brick and Block Masonry Conf., Calgary, Canada, pp.1305-1313.
- Khalaf, F., Hendry, A. y Fairbairn, D. (1991). *Study of the compressive strength of blockwork masonry*, Am. Concr. Inst. Struct. J. 367–375.
- Mehrabi, A.B., Benson Shing, P., Schuller, M.P. y Noland, J.L., (1994), "Performance of masonry-infilled R/C frames under in-plane lateral loads: analytical modeling", *Report No. CU/SR-94/6*, University of Colorado at Boulder.
- Stavridis, A., y Shing, P.B., (2010), "Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames", *Journal of structural engineering*, ASCE, pp. 285-290.

- Bourzam,A., Goto,T. y Miyajima, M., (2008), “Shear capacity prediction of confined masonry walls subjected to cyclic lateral loading”. *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*. Vol.64, N°4, pp. 692-704.
- Lizárraga, J F y J J Pérez Gavilan (2013), “Propiedades mecánicas de la mampostería para la modelación no lineal”, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- Lourenço, P.B. (1996), “Computational strategies for masonry structures”, Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Delft, Holanda
- Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Mampostería.” *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México*, Ciudad de México

Avances experimentales para el diagnóstico del concreto en inmuebles patrimoniales mediante la velocidad de pulso ultrasónico

Nohema Cassandra Ruiz Gómez*
Alberto Muciño Vélez**

Introducción

El estudio del patrimonio de concreto¹ es un tema de creciente interés en la comunidad científica, siendo los retos técnicos un punto central de discusión debido al impacto que pueden generar no solo a la materialidad, sino también a la conservación de sus valores. La escasez de material histórico disponible para ensayos, derivada de las restricciones que implican las inspecciones e intervenciones a un inmueble patrimonial, constituye una limitante significativa para el análisis detallado de sus propiedades físico-químicas. Esta restricción se refleja no solo en el número de muestras, sino también en las dimensiones y las cantidades, lo que restringe el cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos por las normativas. Asimismo, las limitaciones de acceso a determina-

* Universidad Nacional Autónoma de México. arq_ncrg@hotmail.com

** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

¹ Son aquellos edificios, estructuras u otra tipología hecha de concreto y que se considera de relevancia cultural (Macdonald & Arato Gonçalves, 2020).

das áreas del inmueble generan una baja representatividad del material muestra dentro de la totalidad de la estructura (Wilkie & Dyer, 2020).

Moropoulou (2013) señala que, en el pasado las decisiones relacionadas a las intervenciones de conservación se fundamentaban principalmente en la experiencia previa del profesionista, en una identificación inadecuada y no sistemática de las problemáticas, así como en los recursos tecnológicos disponibles. En este sentido, el acercar a los profesionistas y a los investigadores involucrados en la conservación del patrimonio de concreto a reflexionar acerca de las ventajas de incorporar la información obtenida a partir de los ensayos no destructivos (END) y los destructivos (ED), favorecerá la formación de grupos multidisciplinarios donde el intercambio de conocimiento conlleve a un entendimiento profundo del objeto arquitectónico, su materialidad y valores.

No obstante, es necesario también comprender las limitaciones y causas de incertidumbre de los END, ya que, por ejemplo, el uso incorrecto de los equipos o una interpretación errónea de los datos conllevarían a la obtención de información inexacta (RILEM, 2012). Esto dificulta no solo la formulación de diagnósticos precisos, sino que además podría comprometer tanto la materialidad como el significado y los valores culturales del inmueble (Pardo Redondo et al., 2021). Sbartaï et al. (2012) identifican que las causas de incertidumbres de los END se relacionan a la falta de precisión y repetibilidad en un punto determinado del material, a la variabilidad propia del material medido a diferentes escalas y al impacto que generan las condiciones ambientales al elemento estructural o superficie analizada en sitio.

Como parte del desarrollo de un método in situ que integre END para la inspección del patrimonio construido con concreto, se propone la medición de la velocidad de pulso ultrasónico. Este capítulo presenta los avances relacionados con el estudio de la transmisión de la señal de pulso ultrasónico, estableciendo, en primer lugar, una comparativa del tiempo de vuelo y del comportamiento de la señal obtenidos con transductores de cara plana de 54 kHz, exponenciales de 54 kHz y cara plana de 250kHz, con el fin de seleccionar el más adecuado. Posteriormente, se analiza la repetibilidad y precisión de las lecturas en un concreto continuo y otro con discontinuidades en condiciones controladas para respaldar que las variaciones correspondan a características propias del material y no a imprecisiones relacionadas a la operación del equipo y el procedimiento.

Retos en la integración de END al estudio del patrimonio de concreto en México

El componente material y estructural del inmueble patrimonial debe comprenderse y analizarse de forma exhaustiva y con el mismo rigor con que se identifican y adjudican sus valores, donde la importancia del entendimiento desde su génesis, evolución y permanencia hasta nuestros días es una labor crucial (ICOMOS-ISCARSAH, 2003). Se detectó que existen investigaciones enfocadas a la documentación del patrimonio de concreto en México, que brindan valiosa información de las estructuras desde su contexto histórico, social, urbano y arquitectónico, contribuyendo a la construcción de su valor cultural como son las investigaciones de Robles Cairo & Calderón Aguilera (2018), Madrid Quezada & Ortiz San Juan (2024), Silva-Contreras (2023), y Euroza Antúnez (2023).

Con el propósito de comprender las problemáticas respecto al componente material y los fenómenos que lo afectan actualmente, se generó la revisión de la literatura para identificar aspectos como son las proporciones de las mezclas, tipos de agregados, resistencia a la compresión, módulos de elasticidad e incluso caracterizaciones químicas del concreto presente en inmuebles patrimoniales, tanto en su estado original como en su condición actual. En este sentido, se detectó que las investigaciones que abordan de manera específica estos aspectos son escasos, destacando las de Chávez & Sánchez (2024), Peña & Ramos (2024), y Arroyo Rodríguez (2019) por aportar algunos de los pocos datos documentados de esta índole.

En caso de contar con documentación histórica, es posible acceder a información detallada de aspectos relevantes como son los detalles constructivos, las configuraciones espaciales, las etapas constructivas y las intervenciones al inmueble patrimonial. Por el contrario, en ausencia de registros documentales, los END adquieren relevancia, ya que se convierten en una herramienta para obtener información in situ, minimizando la invasividad al inmueble y facilitando la comprensión integral de la estructura. Además, permitirán contrastar, verificar y complementar la información de las fuentes documentales históricas con las condiciones actuales. Ante esto, surge la siguiente pregunta, ¿por qué en México no existe una aplicación extendida de END para la inspección y diagnóstico del patrimonio de concreto?

Primeramente, se encuentran las altas incertidumbres, ya que el éxito de la campaña de medición con END depende en gran medida del correcto planteamiento de los objetivos y los problemas a resolver, así como del conocimiento de las limitaciones inherentes a las técnicas y los equipos. La presencia de inconsistencias, tanto en la aplicación como en la interpretación, conlleva a información poco fiable y resultados que no son los esperados, lo que en algunos casos, lleva como consecuencia a que los END sean percibidos como poco funcionales (McCann & Forde, 2001).

En segundo lugar y debido a las altas incertidumbres no es de extrañar que la aplicación de END para estimar propiedades mecánicas del concreto en los inmuebles se trate con cautela dentro de las normativas. El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en su *Norma Técnica Complementaria para Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes*, establece que los resultados de las estimaciones de propiedades del concreto, tales como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, obtenidos mediante END, serán válidas únicamente si se corroboran con ED, como la extracción de núcleos. Esta práctica es aplicable a monumentos artísticos² y podrá ser considerada y autorizada por las autoridades correspondientes, lo que podría influir en la preferencia de los profesionistas involucrados en los proyectos de conservación, de recurrir directamente a los ED.

En tercer lugar, las razones se vinculan a la práctica profesional, ya que se detectó que los arquitectos-restauradores involucrados en la elaboración de proyectos y la ejecución de obras de conservación del patrimonio de concreto recurren principalmente al uso de calas exploratorias para la visualización y el registro de las características, estado de conservación y la disposición del acero de refuerzo. Por otra parte, los ingenieros destacan que la técnica empleada más ampliamente en los diagnósticos para determinar las resistencias del concreto de los inmuebles patrimoniales es la extracción de núcleos, seguida de las técnicas electromagnéticas para la detección del acero y, en algunos casos, la esclerometría. Finalmente, se deben considerar los enfoques de estudios para la conservación de los inmuebles patrimoniales, donde se vislumbra

² De acuerdo con la Ley Federal de Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (1972), son aquellos bienes muebles e inmuebles que revistan valor estético relevante como representatividad, inserción en determinada corriente estilística, grado de innovación, materiales y técnicas utilizados, y el contexto urbano.

una escasez de investigaciones y publicaciones nacionales capaces de proporcionar datos de carácter cuantitativo y estudios de laboratorio que propicien y complementen el entendimiento de los procesos y factores involucrados en el comportamiento tanto material como estructural de patrimonios construidos con concreto.

Ultrasonidos para la inspección del concreto

Los ultrasonidos son un método de inspección volumétrica que favorece el entendimiento de la integridad del material y las discontinuidades internas a partir la generación de vibraciones mecánicas producidas por una onda ultrasónica (García Cueto, 2007). Los tipos de onda que pueden generarse son las ondas P o de compresión, ondas S o transversales y ondas Rayleigh o superficiales (Malhotra & Carino, 2004). Como se observa en la Figura 1, la onda ultrasónica rompe el equilibrio de las partículas generando desplazamientos en diversas direcciones, en el caso de las ondas de compresión el movimiento de las partículas es paralelo al sentido de propagación de la onda, mientras que las transversales presentan un movimiento perpendicular. Las ondas superficiales muestran un movimiento elíptico retrógrado producto de la combinación del movimiento de las ondas longitudinales y transversales (Bourgeois *et al.*, 2023).

El método ultrasónico para la inspección de estructuras de concreto armado comprende tres técnicas fundamentales, las cuales se diferencian según la modalidad de generación de las ondas de estrés (reflexión o transmisión) y el tipo de procesamiento de las señales involucradas señales (RILEM, 2012). Además, la elección o combinación de las técnicas se determinarán en función de los objetivos específicos de la inspección y las condiciones particulares de la estructura, considerando aplicaciones tales como la medición de espesores y la identificación de discontinuidades en el material. A continuación, se presentan las técnicas ultrasónicas más comúnmente empleadas en la inspección de estructuras de concreto.

- Ultrasonido de pulso eco: se basa en la medición del intervalo de tiempo entre la transmisión de un impulso ultrasónico a la estructura y la recepción de un eco (IAEA, 2002).
- Impacto eco: requiere de un impacto mecánico sobre el concreto, el cual genera ondas y refleja las discontinuidades internas hacia un

transductor receptor. El análisis de la señal se realiza en el dominio de tiempo y frecuencia (Screening Eagle Technologies, 2024).

- Velocidad de pulso ultrasónico: el principio de la técnica consiste en la propagación de ondas en un medio material, las cuales son generadas por un transductor electroacústico que emite una señal que corre a través del material siendo recibida por otro transductor (IAEA, 2002).

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Como se mencionó previamente, las TND se ven influenciadas por diversos factores que pueden alterar la confiabilidad de los resultados obtenidos. En este entendido, resulta fundamental contar con un conocimiento profundo de las limitaciones inherentes a cada técnica, en este caso la VPU, y a los equipos empleados en su implementación. La Norma Mexicana NMX-C-275-ONNCCEE-2020 refiere, de manera general, que el equipo de medición de la VPU está constituido por un generador de pulso eléctrico, transductores, un amplificador y un dispositivo de temporización electrónico que permite medir el intervalo de tiempo que transcurre entre el envío del pulso desde el transductor emisor y su recepción por el transductor receptor (ONNCCE, 2022). Las pulsaciones producidas por el generador de pulso deben tener frecuencias comprendidas entre los 10 kHz y los 150 kHz, mientras que las frecuencias más comunes de los transductores se sitúan en un rango de 50 kHz y 60 kHz³.

Los factores que afectan las mediciones de la VPU son el contenido de humedad y la temperatura del concreto, el acero de refuerzo, la longitud del recorrido y las heterogeneidades inherentes a la materialidad del concreto (IAEA, 2002). Concerniente a los aspectos operacionales, el acoplamiento incorrecto de los transductores puede modificar la amplitud de la onda y generar alteraciones tanto a la atenuación como a la velocidad de propagación del pulso (RILEM, 2012). Por lo tanto, el operador debe asegurar no solo la correcta alineación entre los transductores, sino también la adecuada aplicación del gel para garantizar el acoplamiento eficiente con

3 Existen otros parámetros que pueden definir la frecuencia óptima de los transductores como es la longitud del recorrido, ya que en trayectos de hasta 15m se recomienda emplear frecuencias entre los 10kHz y 40 kHz; mientras que en distancias cortas de hasta 50 mm, se podrá recurrir a altas frecuencias entre 60 kHz y 200 kHz (Asociación Española de Normalización, 2022).

el área de contacto, evitando así la formación de vacíos entre el transductor y el concreto que interfieran con la transmisión y recepción de la señal.

En lo que respecta a la influencia de la humedad en la velocidad de pulso, la literatura reporta diversos porcentajes; por ejemplo, la Norma Mexicana NMX-C-275-ONNCCEE-2020 menciona que la velocidad puede incrementarse hasta un 2% en un concreto saturado (ONNCCE, 2022). Por otra parte, se ha observado que la velocidad de pulso puede incrementarse entre un 4% y 5% cuando se satura un concreto con una relación alta de agua/cemento. Por otra parte Malhotra & Carino (2004) reportan que la velocidad de pulso puede incrementarse entre un 4% y 5% cuando se satura un concreto con una relación alta de agua/cemento. Adicionalmente, es fundamental examinar las condiciones de fabricación tanto de los especímenes como de los elementos estructurales del inmueble colados con la misma mezcla, ya que pueden existir variaciones en la velocidad del pulso atribuibles a las condiciones de curado. De igual manera, pueden presentarse diferencias entre los especímenes fabricados en condiciones de laboratorio y los realizados en sitio.

En relación con la temperatura, la literatura indica que no se observan cambios significativos en las propiedades elásticas y en la resistencia del concreto cuando las variaciones de temperatura se mantienen dentro del rango de los 10 °C y 30 °C; no obstante, se deberán implementar las correcciones pertinentes cuando se registren temperaturas fuera de ese intervalo (ONNCCE, 2022). Respecto a la presencia de acero de refuerzo, es recomendable identificar las barras previo a las lecturas, ya que la velocidad de pulso puede incrementarse hasta el doble en el acero.

Además, la técnica permite estimar propiedades mecánicas del concreto, ya que es posible establecer correlaciones entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión⁴, así como identificar correlaciones teóricas con las propiedades elásticas y la densidad, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (I)$$

4 Se establecerán curvas de correlación a partir de la elaboración de probetas en laboratorio, o bien de los núcleos extraídos directamente de la estructura a evaluar, las cuales se ensayarán a compresión siguiendo las normas y protocolos establecidos para garantizar la validez de los resultados.

Donde:

v = velocidad de la onda longitudinal

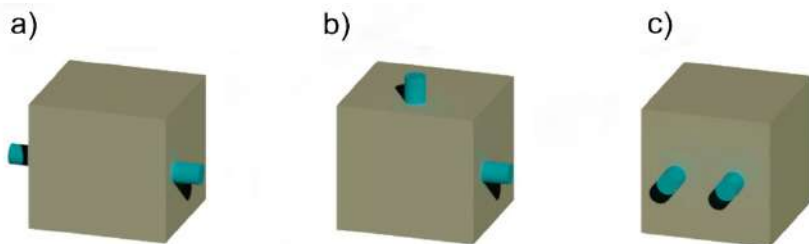
E = módulo de elasticidad dinámico,

μ = coeficiente de Poisson dinámico

ρ = densidad

De acuerdo con la Asociación Española de Normalización (2022), el posicionamiento de los transductores en el elemento a inspeccionar es un factor determinante, por lo tanto, una medición directa será recomendable ya que permite alcanzar la máxima transferencia de energía entre los transductores y brindar una mayor precisión.. En el caso de la medición semidirecta, la principal consideración será la longitud de recorrido, la cual deberá medirse de centro a centro de los transductores. Finalmente, la transmisión indirecta se sugiere solo en situaciones donde no exista la posibilidad de acceder a ambas caras del concreto, cuando se requiera conocer la profundidad de alguna grieta superficial o cuando se busque conocer la calidad de la superficie del concreto. En la medición por transmisión indirecta, la velocidad de pulso se ve influenciadas por la composición superficial del concreto, el cual puede diferir de las características del material en el interior, generando un resultado poco representativo. Asimismo, la diferencia en la velocidad de pulso entre las mediciones directas e indirectas puede oscilar entre el 5% y 20% (IAEA, 2002).

Figura 1:
Disposición de transductores.



Nota: a) Medición directa, b) Medición semidirecta y c) Medición indirecta. Elaboración propia, basada en: Asociación Española de Normalización (2022).

Metodología

Durante la revisión de la literatura se identificó que la mayoría de las mediciones mediante TND en estructuras patrimoniales de concreto se implementaron directamente en el inmueble, como en el caso de las investigaciones de Carmona-Quiroga *et al.* (2021) y Karas (2012). Otros estudios realizaron las pruebas sobre materiales obtenidos directamente del inmueble como Almeida *et al.* (2023) y Jebbawy *et al.* (2022). Por otro lado, Brencich & Nebiacolombo (2020) y Wilkie & Dyer (2020) utilizaron como base los documentos históricos y algunas muestras del material para intentar replicar, en la medida de lo posible, las condiciones originales para generar los ensayos. Finalmente, algunos estudios se apoyan en vastas bases de datos que recopilan información de los ensayos de laboratorio a través del tiempo como Fantilli *et al.* (2017). Debido a que no se dispone de material original de concreto de inmuebles patrimoniales y con el fin de controlar las posibles variables que puedan afectar la señal, se procedió a elaborar probetas en el laboratorio en esta primera etapa.

La campaña experimental en el laboratorio fue diseñada con dos objetivos principales, en primer lugar, identificar los transductores que transmiten la señal de manera óptima, mediante el análisis de tiempo de vuelo y la velocidad de pulso; y, en segundo lugar, verificar la repetibilidad y precisión de las lecturas en un concreto continuo y otro con discontinuidades en condiciones controladas. La elaboración de las probetas y las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Durante la campaña experimental, se utilizó un equipo Pundit PL-200 de la marca Proceq, así como transductores de cara plana de 54kHz y 250 kHz, donde las consideraciones para su selección fue su funcionamiento para registrar las ondas P y la disponibilidad de los transductores en el laboratorio. Adicionalmente, se incorporaron los transductores exponenciales de 54kHz, debido a sus características de diseño que reduce el área de contacto⁵, minimizando la invasividad a los inmuebles.

Como primera aproximación, se propuso el análisis de la variación en el tiempo de vuelo del pulso, tomando como variables el tipo de trans-

5 El área de contacto de los transductores exponenciales es de 4mm, los de cara plana de 54kHz es de 36.77mm y el área de los de 250kHz corresponde a 22.27mm.

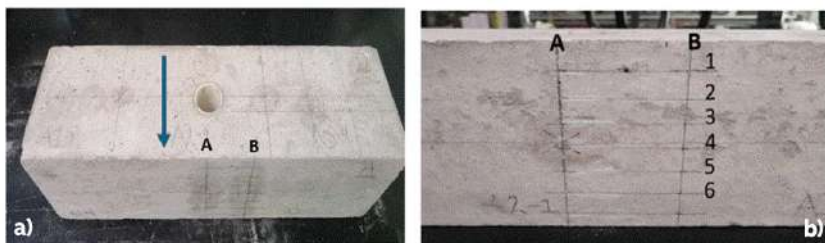
ductor⁶ y la continuidad del medio material. Las mediciones se realizaron en probetas tipo viga con dimensiones de 15cm x 15cm x 50 cm; algunas en una sección de concreto continuo y otras con discontinuidades intermedias. Una vez identificados los defectos más comunes que pueden generar discontinuidades en el concreto, se incorporaron fragmentos de poliestireno expandido en dos secciones de la viga, así como un tubo de PVC en la sección central.

De acuerdo con las recomendaciones de Breysse & Balayssac (2021) sobre la organización en escalas de los ensayos *in situ*, y como se observa en la Figura 2, se considerará la totalidad de la probeta como la región de ensayo. Los ejes A y B serán definidos como los puntos de ubicación de las pruebas, mientras que las lecturas de ensayo corresponderán al valor obtenido a partir de una sola medición en un punto específico numerados del 1 al 6.

Las lecturas⁷ se realizaron con una disposición de transmisión directa, con una distancia de 15 cm entre los transductores, y un distanciamiento de dos centímetros los seis puntos a lo largo de los ejes A y B. Los parámetros definidos en el equipo fueron: el tipo de transductor, la frecuencia de repetición de pulso, la distancia entre transductores y finalmente la puesta a cero con la varilla de calibración. Se colocó el gel acoplante en los transductores para realizar las lecturas en cada uno de los puntos y se almacenaron para su posterior análisis.

Figura 3.

Probeta y transductores. a) Probeta con discontinuidad, b) Trazo de las regiones y lecturas de ensayo de la campaña experimental. c) Transductores de 54 kHz, 250 kHz y exponenciales de 54 kHz



6 Se ha observado la velocidad de pulso puede modificarse entre un 15 a 20% debido a la elección de los transductores (RILEM, 2012).

7 La lectura proporciona el tiempo del recorrido, y por lo tanto, al ser conocidos el tiempo (T) y la distancia (L), se realiza el cálculo de la velocidad del pulso (v) con la fórmula $V=L/T$ (ONNCCE, 2022)



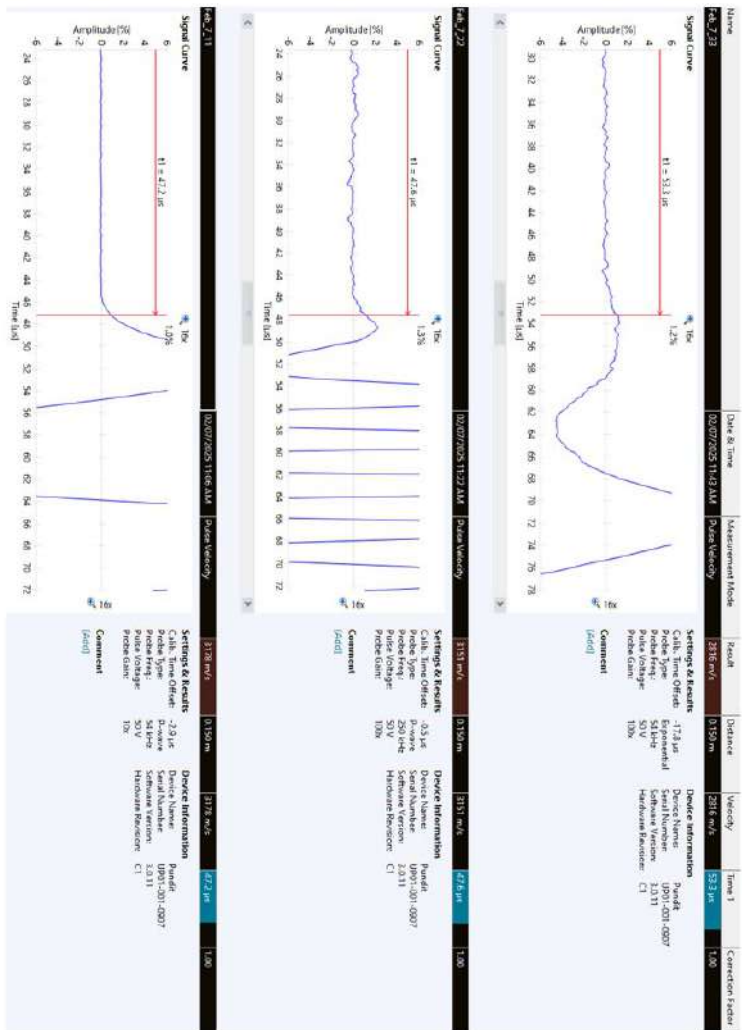
Resultados

Las lecturas obtenidas el primer día fueron analizadas con el visor de onda para evaluar el comportamiento de la señal durante el tiempo de vuelo de los tres tipos de transductores en un solo punto de la probeta. En la Figura 3 se presentan las señales recolectadas en el punto B3, donde se observa, en primer lugar, que el tiempo de vuelo registrado por el equipo no coincide con el nodo, sino que se localiza dentro de la onda. Además, se aprecian perturbaciones más notorias en la señal de los transductores exponenciales y los de 250kHz. El tiempo de vuelo máximo corresponde a los transductores exponenciales con un valor de 53.3 μ s, mientras que el más bajo de 47.2 μ s, se obtuvo con los de cara plana de 54 kHz, resultando una diferencia de 6.3 μ s. Un análisis similar se realizó con las lecturas realizadas sobre el eje A, con el objetivo de verificar la precisión de transmisión a través de la sección que contiene el PVC. En el punto A3 se visualizó un comportamiento comparable en cuanto a las perturbaciones de la señal; sin embargo, las diferencias del tiempo de vuelo entre los transductores exponenciales y los de cara plana de 54kHz se incrementaron alcanzando una diferencia de 12.4 μ s.

Posteriormente, se realizó el ajuste manual de los tiempos en el visor de forma de onda con el objetivo de determinar si existían variaciones significativas entre los tiempos y las velocidades registradas por el equipo. En el caso de los transductores de cara plana de 54 kHz, la identificación del comienzo de la onda en la señal es claro, lo que facilitó el ajuste. En contraste, el ajuste con los transductores exponenciales presentó mayor complejidad, lo que aumentó las probabilidades de error, razón por la cual se descartó continuar las mediciones con estos transductores. En cuanto al eje A, las lecturas con los transductores de 54 kHz y 250kHz se repitieron tres veces en días diferentes, obteniendo un total de dieciocho, mientras que en el eje B la repetición fue de cuatro días con un resultado

final de veinticuatro lecturas. Cabe destacar que todas las mediciones fueron realizadas por el mismo operador con la finalidad de garantizar la consistencia en la ejecución del procedimiento.

Figura 43
Análisis de tiempos de vuelo y transmisión de señal en el visor de onda



En la Tabla I se muestran las lecturas del tiempo de vuelo y la velocidad de pulso obtenidas a lo largo del eje B, utilizando los transductores de 54 kHz y los de 250 kHz, así como los valores correspondientes a los ajustes realizados en el

visor de forma de onda. El menor rango de tiempos se obtuvo con el ajuste a los transductores de 54 kHz, con un valor de 3.7 μ s con una mediana es de 45.85 μ s. Por otro lado, el mayor rango en el tiempo fue de 6.9 μ s correspondiente al ajuste de los transductores de 250 kHz donde la mediana es de 46.5 μ s. Es posible que el incremento se deba a la presencia de un valor atípico de 41.4 μ s.

Tabla 1.

Comparativa de las lecturas entre transductores de 54kHz y 250kHz.

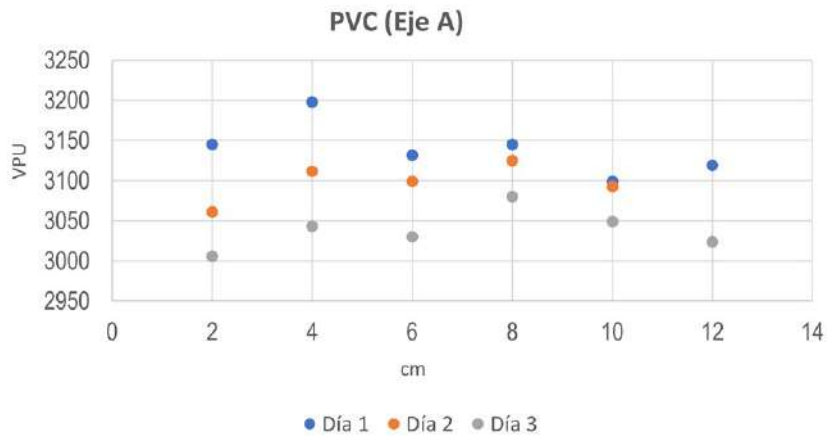
	Sin ajuste 54 khz		Con ajuste 54 khz		Sin ajuste 54 khz		Con ajuste 54 khz	
	Tpo. (μ s)	v (m/s)	Tpo. (μ s)	v (m/s)	Tpo. (μ s)	v (m/s)	Tpo. (μ s)	v (m/s)
Día 1	46.47	3212	45.6	3289	51.9	2890	48.3	3106
	45.7	3282	44.4	3378	45.4	3304	41.4	3623
	45.5	3304	44.2	3394	46.1	3254	44.5	3371
	46.2	3247	44.9	3341	47.1	3185	45.5	3297
	46.7	3212	45.3	3311	47.2	3178	45.7	3282
	47.3	3171	45.9	3268	48.6	3086	46.8	3205
Día 2	47.7	3165	45.8	3275	48.7	3080	46.6	3219
	46.8	3205	45.4	3304	47.3	3171	46.5	3226
	46.1	3254	45	3333	45.9	3268	44.4	3378
	46.8	3205	45.6	3289	47.4	3165	46.1	3254
	47.2	3178	45.6	3289	46.9	3198	46.2	3247
	49.6	3024	47.9	3132	47.8	3138	46.7	3212
Día 3	47.9	3132	46.9	3198	49.4	3036	48.1	3119
	47.4	3165	46	3261	48.6	3086	47.3	3171
	47.2	3178	45.6	3289	47.6	3151	45.9	3268
	48.2	3112	46.6	3219	48.2	3112	46.8	3205
	49.2	3049	47.3	3171	48.6	3086	46.5	3226
	49.1	3055	47.8	3138	49.6	3024	47.4	3165
Día 4	48.6	3086	46.8	3205	49.3	3043	47.2	3178
	48.2	3112	46.8	3205	47.6	3151	45.7	3282
	47.3	3171	45.5	3297	46.8	3205	45.5	3297
	47.8	3138	46.6	3219	47.4	3165	46	3261
	48.4	3099	46.6	3219	48.2	3112	46.6	3219
	49.4	3036	47.5	3158	49.8	3012	48.1	3119

Fuente: Elaboración propia

Debido a lo anterior, se concluyó que los transductores de 54 kHz son la opción más adecuada para realizar las lecturas y analizar tanto la repetibilidad como la precisión de las mediciones en el concreto continuo y con discontinuidades. En las Gráficas 1 y 2 se observa la diferencia en los rangos de las velocidades del eje B, con un valor máximo de 3394 m/s y uno mínimo de 3132 m/s, presentando una incertidumbre del 7.72%. Por otro lado, las velocidades registradas a lo largo del eje A varían entre los 3198 m/s y 3006 m/s, con un 6% de incertidumbre. Las diferencias entre las velocidades del eje A y B, pueden explicarse debido a la obstrucción del haz ultrasónico lo cual genera que el primer impulso se difracte alrededor del PVC aumentando la distancia del recorrido (Asociación Española de Normalización, 2022). Las velocidades más altas en ambos casos se registraron el día 1, mientras que las mínimas fueron obtenidas el día 2.

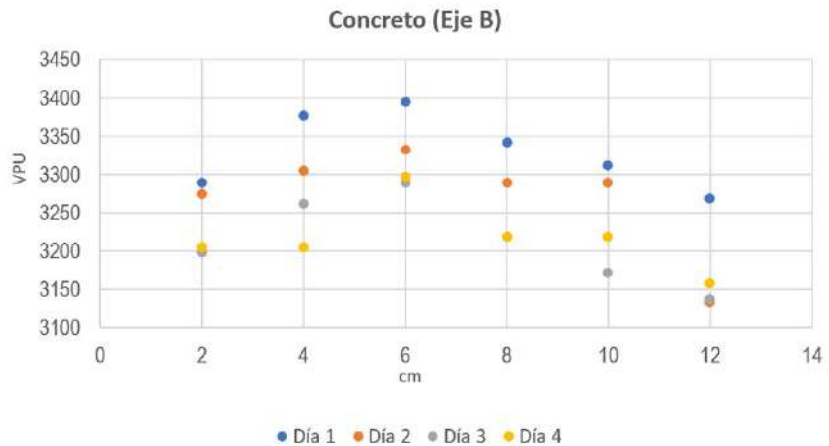
De acuerdo con la clasificación cualitativa de la calidad del concreto por durabilidad que establecida en la NMX-C-275-ONNCCE-2020, el concreto de la probeta podría clasificarse con una calidad media, ya que las velocidades se encuentran dentro del rango de 3000m/s a 3500 m/s. No obstante, estos resultados denotan la importancia de recurrir a técnicas complementarias que permitan obtener más información cuando se realiza una campaña *in situ*. Esto facilitaría, primeramente, a la identificación y eliminación de variables que afecten la velocidad del pulso, tales como el acero de refuerzo y discontinuidades que presentes en el interior de un elemento estructural. Una posibilidad es la combinación de tomografías o del radar de penetración, junto con los datos obtenidos a partir de la velocidad de pulso, los cuales facilitarían la comprensión y la determinación de áreas para desarrollar muestreos más detallados en un elemento estructural. Asimismo, permitirían atribuir las variaciones en las velocidades del pulso a las propiedades intrínsecas del concreto.

Gráfica 1.
Lecturas de velocidad de pulso en el eje A.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2.
Lecturas de velocidad de pulso en el eje B.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados de la campaña experimental muestran que los transductores de cara plana de 54 kHz son los más adecuados para la medición de la VPU bajo las condiciones establecidas, ya que permiten identificar con mayor claridad el inicio de la onda, facilitando el ajuste de forma más precisa y confiable; además de un mayor control por parte del operador favoreciendo la transmisión y consistencia en los datos. A pesar de que los transductores exponenciales poseen una menor área de contacto, en concordancia con el principio de mínima intervención aplicado en la conservación del patrimonio, presentan limitaciones en la calidad de la señal, ya que registraron tiempos de vuelo más altos y mayores dificultades operativas tanto en la realización de lecturas como en el ajuste.

Respecto a la transmisión en un medio continuo y discontinuo, se observa que es posible identificar discontinuidades en un elemento a partir de las comparativas entre las VPU. Se corroboró que los valores de las velocidades de pulso ultrasónico en un concreto continuo son mayores que en aquel que presenta discontinuidades. En el caso de la probeta estos valores corresponden a 3394 m/s y 3198 m/s, respectivamente. Es importante mencionar que los resultados obtenidos en laboratorio y su escala de trabajo son una primera aproximación a la técnica, por lo tanto, se deberán contrastar posteriormente con los datos y experiencias producto de la exploración in situ del inmueble para caminar hacia la construcción del método.

Estas aproximaciones experimentales a la transmisión y repetibilidad de la VPU permiten establecer procedimientos para analizar la materialidad original de los inmuebles patrimoniales, y sentar las bases para la incorporación y aplicación práctica de los END en proyectos de conservación. Además, permiten identificar puntos de convergencia, entre las recomendaciones para la conservación del patrimonio de concreto y las normativas vigentes relacionadas a la VPU, favoreciendo la protección de los valores del inmueble y priorizando los END sobre los ED.

Referencias

- Almeida, L., Santos, A., Santos Silva, A., Veiga, M., & Velosa, A. (2023). *Characterization of Mortars and Concretes from the Mirante da Quinta da Azeda, Setúbal (Portugal). A Case Study from the Beginning of the 20th Century* (pp. 243–257). https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_19
- Arroyo Rodriguez, V. (2019). *El trabajo multidisciplinario en la restauración : propuesta para el diagnóstico e intervención del mural de la Biblioteca Central de Juan O´Gorman*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Asociación Española de Normalización. (2022). *Ensayo de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*. En UNE-EN-12504-4.
- Athanasopoulos, G., Pelekis, P., & Anagnostopoulos, G. A. (2000). “Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 277–288. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00009-9)
- Bourgeois, I., Gregorio, L. T. Di, Rodrigues, H., Fonseca, J., Tavares, A., & Costa, A. (2023). “Application of Sonic Tests and Modal Identification in the Characterization of Masonry Walls”. *Applied Sciences*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063762>
- Brenchich, A., & Nebiacolombo, M. (2020). “Anchorage of reinforcement bars in Hennebique structures”. *Construction and Building Materials*, 265, 120184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120184>
- Breyse, D., & Balayssac, J.-P. (Eds.). (2021). *Non-Destructive In Situ Strength Assessment of Concrete Practical Application of the RILEM TC 249-ISC Recommendations*. (1a ed.). Springer Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-64900-5>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1972). Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticos e Históricos .
- Carmona-Quiroga, P., Pachón-Montaña, A., de Llano Moya, J., Martín-Caro, J. A., López, D., Paniagua, I., Martínez, I., Rubiano, F., García-Lodeiro, I., Fernández-Ordóñez, L., Blanco-Varela, M., & Frías-López, E. (2021). *Characterisation and diagnosis of heritage concrete: case studies at the Eduardo Torroja Institute, Madrid, Spain*. *Materiales de Construcción*, 71, e262. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11021>
- Euroza Antúnez, R. B. (2023). *El estado ruinoso de la casa de bombas de Nativitas y su condición patrimonial en Xochimilco*. *Academia XXII*, 14(27), 6–31. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2023.27.85738>
- Fantilli, A. P., Frigo, B., & Chiaia, B. (2017). “A simplified approach to the evaluation of the strength of old concrete”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 171(6), 257–266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00010>

- García Cueto, A. R. (2007). *Introducción a los Ensayos No Destructivos* (Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos, Ed.).
- IAEA. (2002). *Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures* (IAEA, Ed.).
- ICOMOS. (2017). *Approaches to the Conservation of Twentieth -Century Cultural Heritage*. Madrid- New Delhi Document.
- ICOMOS-ISCARSAH. (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*.
- Jebbawy, M., Thiéry, V., Bouichou, M., Marie-Victoire, E., Davy, C., Izoret, L., Albert-Mercier, C., & Moreau, M. (2022). “Study of the first Boulogne-sur-Mer cements used for a historic aqueduct from the 19th century”. *Materiali in tehnologije*, 56. <https://doi.org/10.17222/mit.2022.554>
- Karas, S. (2012). “Unique Hennebique Bridges in Lublin, Poland”. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1, 47–51. <https://doi.org/10.12691/ajcea-1-2-5>
- Macdonald, S., & Arato Gonçalves, A. P. (2020). *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance*. Getty Conservation Institute.
- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press Inc.
- McCann, D. M., & Forde, M. C. (2001). “Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures”. *NDT & E International*, 34(2), 71–84. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
- Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013). “Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage”. *Construction and Building Materials*, 48, 1222–1239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.044>
- ONNCCE. (2022). NMX-C-275 ONNCCE-2020. *Determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico a Través del Concreto- Método de Ensayo* (DOF, Ed.).
- Pardo Redondo, G., Franco, G., Georgiou, A., Ioannou, I., Lubelli, B., Musso, S., Naldini, S., Nunes, C., & Vecchiattini, R. (2021). *State of Conservation of Concrete Heritage Buildings: A European Screening. Infrastructures*, 6, 109. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080109>
- Peña, F., & Ramos, J. (2024). *Dynamic Characteristics of a 1950s Heritage Building: A Comparison of Original Design Methods and Modern Techniques*. *Buildings*, 14, 1–19. <https://doi.org/10.3390/buildings14092944>
- RILEM. (2012). “Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques (Breyse Denys, Ed.)”. *Springer Netherlands*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2736-6>
- Robles Cairo, C., & Calderón Aguilera, C. M. (2018). Patrimonio e industrialización. El concreto armado en la arquitectura de Mexicali, México, 1915-1930. *Gremium*, 5(9), 19–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.56039/rgn09a03>

- Sbartai, Z.-M., Breysse, D., Larget, M., & Balayssac, J.-P. (2012). "Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties". *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 725–733. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.005>
- Screening Eagle Technologies. (2024). *Concrete Integrity Testing with Impact Echo*.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2021). *Introduction to Non-destructive Testing*. https://asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx
- Wilkie, S., & Dyer, T. (2020). "Challenges in the Analysis of Historic Concrete: Understanding the Limitations of Techniques, the Variability of the Material and the Importance of Representative Samples". *International Journal of Architectural Heritage*, 16, 1–16. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1749728>

SECCIÓN II: OPTIMIZACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

Optimización de morteros por sustitución de áridos para mampostería estructural ligera

Antonio Tahuitón Mora*
Eligio Alberto Orozco Mendoza**

Introducción

En México el sistema constructivo para muros de carga con mayor demanda en la autoproducción de vivienda es la mampostería de cemento arena, ya sea mediante producción industrial o elaborados de manera artesanal. Y la normatividad en la Ciudad de México indica que los mampuestos de los muros de carga deben cumplir con una resistencia mínima a la compresión de 100 kg/cm^2 para su uso estructural. Pero estudios realizados en piezas individuales base cemento arena, demostraron que los mampuestos alcanzan una resistencia de 60 kg/cm^2 , y un metro cuadrado edificado con estos materiales representa 290 kg, lo que significa muros pesados y con baja resistencia mecánica. Por tanto, se define el problema en la deficiente relación resistencia mecánica-densidad, que establecen un estado latente de riesgo estructural, colocando al inmueble en una situación de vulnerabilidad ante fenómenos naturales.

* Universidad Nacional Autónoma de México. antonio.tahuiton@fa.com.mx

** Universidad Nacional Autónoma de México. eligio@fisica.unam.mx

La densidad que presentan los tabiques o blocks de cemento-arena convencionales implica un aporte de carga a la estructura, y la resistencia a la compresión encontrada en las evaluaciones determinan que los mampuestos más utilizados en la construcción de muros se encuentran por debajo de los parámetros establecidos. Un elevado porcentaje de la construcción de muros en México se describen como elementos constructivos robustos (Akça *et al.*, 2015), lo que significa mayor costo económico, ambiental, y más cargas a la estructura.

Ante la inadecuada relación densidad-resistencia mecánica que presentan las mamposterías, se busca mejorar la relación peso densidad en los mampuestos. Se encontró que la sílica gel posee una densidad 56% menor en comparación a la arena convencional, por lo tanto, si se utiliza sílica gel como agregado fino, se podría reducir la densidad de las mezclas y, entonces, se podrían elaborar piezas con una densidad baja y obtener una resistencia axial de 100 kg/cm², que acorde a la normatividad se clasificaría como un elemento estructural. Por consiguiente, el objetivo de la investigación es lograr un diseño de mezcla para morteros de tipo estructural, utilizando partículas de sílica gel como sustitutos al árido convencional

Componentes del diseño de mezcla

Las mezclas de mortero comparten similitudes con las utilizadas para la elaboración de blocks de cemento-arena (empleados en sistemas de muros de mampostería), pero al adicionar un agregado distinto, o modificar las características de tamaño de partícula, densidad, porosidad o dosificación, se tienen que realizar pruebas a la mezcla en estado fresco y pruebas de compresión al material en estado seco, para determinar si las condiciones físicas de la mezcla cumplen con las condiciones de trabajabilidad, adherencia y plasticidad, así como la resistencia a la compresión axial. Algunas de las variables que modifican las condiciones físicas y mecánicas de los morteros es el contenido de limos o arcillas, que disminuyen la resistencia mecánica, pero mejoran la trabajabilidad. Una mezcla con alto contenido de cemento aumenta la resistencia mecánica, pero presentará retracción por secado, y con respecto al agua, una menor cantidad, significa más resistencia que un mortero húmedo. (Gutiérrez de López, 2003).

Para evitar bajas resistencias mecánicas y afectaciones en la durabilidad del mortero, la norma ASTM C-109 indica que la relación agua-cemento (a/c) ideal es de 1:0.485 y la relación cemento agregado (c/a) es de 1:2.75.

Una carencia de agua en una mezcla implica menor fluidez, dando como resultado cavidades o bolsas de aire al interior. Estos poros podrían provocar fallas en el material, una disminución en la resistencia de la mezcla y no sería posible garantizar una correcta distribución de los agregados al interior del elemento. En mezclas fluidas es común que se presente la segregación del material, es decir que el agregado pétreo descienda o flote con relación a su peso.

Del 100% del volumen de agua utilizado para la hidratación del cemento, únicamente el 23% se combina químicamente con el cemento, dando paso a la reacción de hidratación. El 77% de agua restante es absorbida por el compuesto generado en la hidratación del cemento.

Cemento

Para la investigación se utilizó un cemento tipo II con clasificación CPC 30R RS, se trata de un cemento Portland compuesto con una resistencia de 30 MPa, resistente a sulfatos. Se eligió esta clasificación por ser el tipo de cemento con mayor presencia en el mercado donde se desarrolló el trabajo, favoreciendo su abasto para satisfacer la demanda.

Agregado fino

La norma ASTM C-33 define a las arenas o agregados finos como fragmentos de roca cuyo tamaño de partícula se encuentra entre 0.15mm y 4.75mm (Neville, 2013). Las arenas otorgan propiedades de trabajabilidad y resistencia mecánica, dependiendo de la cantidad de agua o humedad en su interior. Los materiales de origen artificial tendrán un índice de absorción de humedad menor comparada contra un material de origen natural, a consecuencia del intemperismo sobre la superficie de las partículas que deriva en la formación de poros (Neville, 2013). La interacción de la arena con el agua no provoca cambios en su estructura, pero influyen en las características de las mezclas. (Metha y Monteiro, 1998) por ello se busca conocer el grado de absorción del material y el peso volumétrico de los agregados. La gran mayoría de las arenas de origen natural o artificial, tienen un peso volumétrico que va desde los 1,520 hasta los 1,680 kg/m³ (Metha y Monteiro, 1998).

El tamaño de los agregados influye directamente en la mezcla, con relación a la absorción de agua, la trabajabilidad, cantidad de cemento,

porosidad y durabilidad. Una buena combinación en los tamaños del agregado resulta en una mejor distribución de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de compresión (Gutiérrez de López, 2003). Una mezcla donde únicamente se utilice un solo tamaño de partícula, tendrá una taza mayor de espacios vacíos o cavidades. La finalidad es disminuir la cantidad de cavidades entre las partículas del agregado y la pasta de cemento, lo cual propicia en la optimización de la cantidad de pasta de cemento requerida, mejorando con ello la durabilidad de las mezclas (Mather *et al.*, 2004).

El módulo de finura (MF) es un índice de la finura de los agregados; se calcula sumando los porcentajes de material acumulado y retenido en cada uno de los tamices y dividiendo la suma entre 100. Para el caso de los agregados finos, la norma ASTM C-33 determina que el módulo de finura deberá de ser mayor a 2.3 y menor a 3.1 (Steven *et al.*, 2004). Entre menor sea el módulo de finura (MF) nos indica que se trata de una arena gruesa, mientras que un MF alto significara que nos encontramos con una arena fina (Muciño-Castañeda, 2013).

La durabilidad de las mezclas dependerá de la composición química del agregado, recordando que la pasta de cemento es un material alcalino, se encontrara vulnerable ante la mayoría de los ácidos (Muciño-Castañeda, 2013). Los minerales más comunes encontrados en la composición de los agregados son, silicatos, feldespatos, sulfatos, sulfitos de hierro y óxidos de hierro (Muciño-Castañeda, 2013). La norma ASTM C-294 nos proporciona contenidos de minerales micáceos, minerales de carbonato, minerales de sulfato, minerales de sulfuro de hierro, minerales de ferromagnesio, zeolitas, minerales de óxido de hierro y minerales de arcilla (Neville, 2010). Lo anterior puede generar reacciones químicas perjudiciales entre los componentes activos de la sílice del agregado y los álcalis del cemento. Siendo el ópalo, calcedonia y tridimita las partes reactivas de la sílice, la reacción comienza con el ataque de los hidróxidos alcalinos del cemento por los minerales silíceos del agregado, formando un gel de álcali-silicato, llegando inclusive a destruir la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento que lo rodea (Neville, 2003)

Inicialmente se consideró que el 16.2% de las fallas o deterioros presentes en estructuras de concretos eran ocasionadas por una mala selección de los agregados. Sin embargo, estudios más recientes han aumentado esta cantidad hasta en un 30%. Dando un panorama de la importancia de una

correcta selección de los agregados, desde la etapa de diseño (Barbudo y Borges, 2001). pero una vez que ha absorbido la humedad del ambiente u otras fuentes cambia a una tonalidad verdosa oscura.

Sílica gel

Se utilizó sílica gel Figura 1, como agregado para sustituir un porcentaje del volumen de la arena en las mezclas de mortero. El cual presenta una forma esférica con un diámetro que va de los 3mm a los 5mm. El color que tiene es de tonalidades naranjas.

Figura 1.

Sílica gel con un tamaño de 3mm a 5 mm (izquierda) y después del triturarse buscando una granulometría similar al de la arena (derecha)



Dada la forma esférica de la sílica gel se dificulta su implementación en las mezclas por dos razones primordiales, la primera es la adherencia que pueda presentar con las pastas de cemento, considerando que entre mayor sea la irregularidad de las partículas, mayor será su grado de adherencia e integración en la mezcla. La segunda es la granulometría, por ser de origen industrial, son controlados los diámetros del material, dificultando una mezcla de distintos tamaños de granos, como el encontrado en las arenas convencionales. Razón por la cual fue necesario someter a la sílica gel a un proceso de trituración mecánica, garantizando contar con una granulometría muy similar a la encontrada en la arena de referencia.

Agua

Para descartar al agua como una variable en la experimentación se utilizó agua comercial embotellada, utilizándola durante toda la experimentación con la finalidad de evitar reacción negativa primordialmente con el cemento, si el agua contiene un exceso de impurezas se ve afectado el tiempo de fraguado y la resistencia de las mezclas (Muciño-Vélez, 2015).

Materiales y método

Se determinó la cantidad de sílica gel necesaria para obtener una mezcla con las condiciones óptimas de trabajabilidad. Después se analizó la relación entre la densidad y la resistencia de las mezclas propuestas y, luego, se identificó si era necesario la utilización de aditivos a la mezcla. El siguiente paso consistió en conocer el comportamiento de las partículas de sílica gel dentro de la mezcla y las afectaciones de la granulometría del agregado fino en las resistencias mecánicas de las mezclas. A continuación, se determinó si las arenas utilizadas para la construcción en la ciudad de México cumplen con la granulometría establecida en la norma ASTM C-33.

Para analizar los agregados seleccionados se utilizó la norma ASTM C-33, se realizó la prueba de tamizado a la arena rosa, junto a tres distintos tipos de arena empleadas en la construcción, puntualmente en la ciudad de México y zona metropolitana donde se comercializa la arena gris y rosa, el municipio de Nochixtlán, Oaxaca la arena café y el polvo de piedra del estado de Yucatán, que se utiliza en sustitución de arena, por ser una región que carece de minas de arena. Para obtener su curva granulométrica y el módulo de finura.

Para la dosificación y las proporciones de los agregados en las mezclas, se utilizaron los parámetros establecidos en la norma ASTM C-109, la cual se establece una relación cemento-agregado de 2.75 y cemento-agua de 0.485. Estos parámetros se tomaron para la elaboración de la mezcla de control. Además, se garantizó que los agregados no fueron manipulados previamente; la arena se empleó tal como se comercializa, sin modificar su granulometría y libre de materia orgánica. Por último, se verificó que el cemento utilizado no presentara indicios de humedad o una hidratación previa y se realizaron tres diseños de mezcla distintos.

En la mezcla de control se utilizó arena convencional sin graduar, para la mezcla tamizada se utilizó la misma cantidad de arena, pero ésta fue graduada conforme los parámetros de la norma ASTM C-33, el diseño de la mezcla ligera sustituye parcialmente el volumen de la arena por sílica gel como material aligerante en una relación de 2/3 de arena por 1/3 de sílica, se utilizó un aditivo superplastificante para compensar la demanda de humedad de la sílica. Utilizando el mismo cemento y agua en todos los casos. Las proporciones se muestran en la Tabla 1, donde la arena tamizada es la arena rosa, una vez manipulada su granulometría.

Tabla 1.

Dosificación de mezclas de mortero utilizando arena rosa sin manipular previamente, mezcla tamizada empleando arena rosa, la cual ha sido manipulada previamente para modificar su curva granulométrica de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM C-33 y la mezcla ligera en la cual se sustituye parcialmente el volumen de arena rosa cuya curva granulométrica cumple con los parámetros de la norma ASTM C-33 por sílica gel como material aligerante.

Mezcla	Cemento (g)	Arena sin tamizar (g)	Arena tamizada (g)	Sílica Gel (g)	Aditivo (ml)
Mezcla de control	210	577.5	0	0	0
Mezcla Tamizada	210	0	577.5	0	0
Mezcla Ligera	210	0	396.9	180.6	52.5

La norma ASTM C-109 indica tres piezas como número mínimo de especímenes por cada día de prueba. Sin embargo, para disminuir la desviación estándar de los resultados, se colaron cinco muestras por cada día de prueba. Por cada día de prueba se elaboraron cinco muestras, las cuales fueron probados a los 7, 14 y 28 días, dando como resultado que, por cada diseño de mezcla propuesto, se colarían mínimo 15 muestras, Figura 2. La mezcla fue vertida dentro de los moldes en estado fresco y varillada para eliminar o disminuir la cantidad de aire del interior, se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas, posteriormente

fueron desmoldadas y clasificadas, continuando su proceso de secado a temperatura ambiente hasta el día de la prueba mecánica.

La prueba de compresión se encuentra establecida en la norma ASTM C-109, para esta experimentación se realizaron pruebas a los 7, 14 y 28 días respectivamente (ver Figura 3).

Figura 2.

Colado de 15 probetas cúbicas de 3cm por cada diseño de mezcla de mortero



Figura 3.

Probetas cúbicas de 3cm utilizadas para las pruebas de compresión a 28 días



Para determinar si las partículas de sílica gel se integraron adecuadamente en la mezcla de mortero y se presenta una buena adherencia con la pasta de cemento, se implementó la técnica de microscopía óptica. Para llevar a cabo esta caracterización fue necesario realizar un corte transversal de la muestra, con la finalidad de obtener una mejor perspectiva de la distribución de los agregados en la mezcla. Esta técnica ha sido de gran utilidad en otras investigaciones, para observar cualidades como cantidad, tamaño, forma y color de los agregados.

Para un análisis de microscopía electrónica de barrido fue necesario cortar la muestra en secciones no mayores a 2mm de espesor, además de garantizar que la muestra se encuentra libre de humedad, posteriormente las muestras son montadas sobre una base metálica o platina a la cual se fijan por medio de cintas de carbón, para establecer un mejor flujo de electrones durante el análisis, Figura 4.

Figura 4.

Corte del material no mayor a 2mm, montados sobre la platina y fijados con cintas de carbón.



Mediante esta técnica, es posible conocer la estructura y orientación del grano del material analizado. Para conocer el acomodo de los cristales dentro de la mezcla, y determinar si la adición de sílica gel, favorece o perjudica la formación de dichos cristales. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido JSM – 5600 F.

Para determinar si la adición de sílica gel modifica de alguna forma el pH de las mezclas de mortero, se realizaron mediciones del pH que presentaban las muestras de la mezcla de control y la mezcla ligera donde se sustituye un porcentaje del volumen de la arena por sílica. Para realizar esta medición sobre muestras secas se utilizó agua destilada, para hidratar la muestra sin que el agua modifique el pH de la muestra, una vez saturada la muestra, se midió el pH con tiras reactivas.

Granulometría

Al obtener la curva granulométrica de las arenas por medio de la técnica de tamizado descrita en la norma ASTM C-33, se indica los porcentajes máximos y mínimos del tamaño de grano, con los que deberán de contar las arenas, con lo anterior es posible determinar si las arenas analizadas se encuentran dentro de estos parámetros.

La Gráfica 1 indica los límites máximos y mínimos establecidos por la norma, donde se aprecia que ninguna de las arenas analizadas se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normativa, sin embargo, siguen siendo utilizadas en la industria de la construcción. El módulo de finura de las diferentes arenas se presenta en la Tabla 2

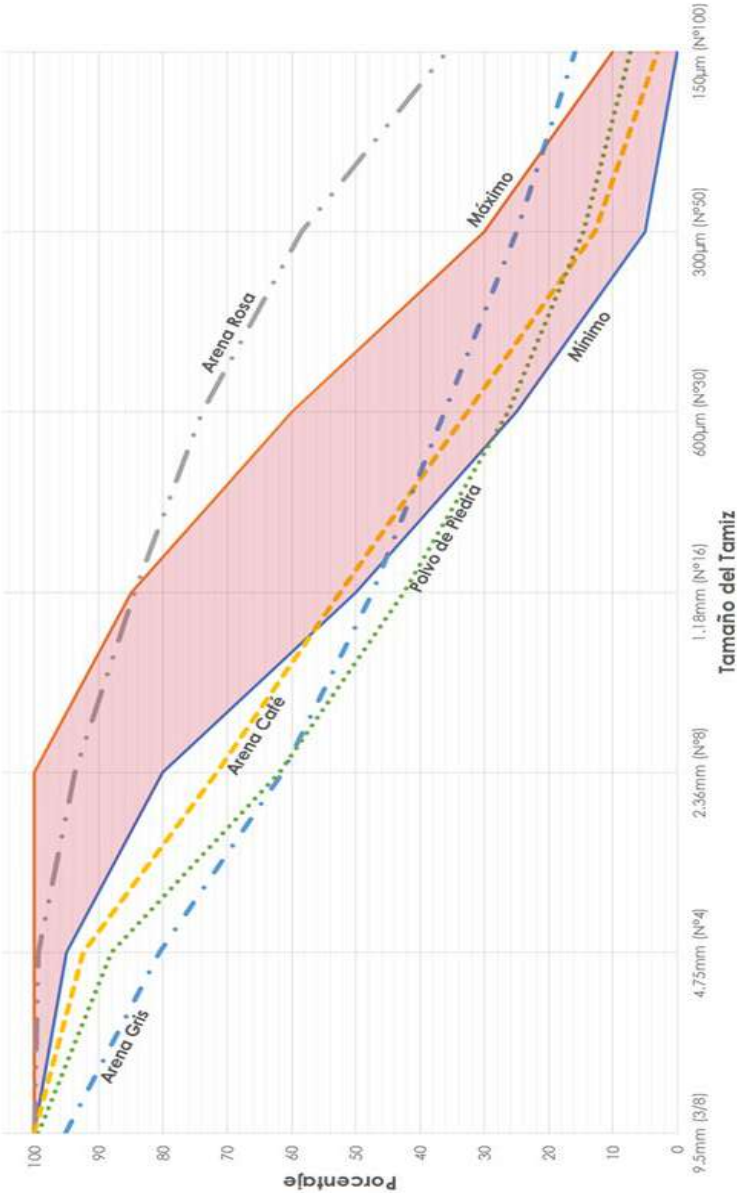
Tabla 2.
Módulo de finura de las arenas analizadas

Arena	Arena Rosa	Arena Café	Arena Gris	Polvo de piedra
Módulo de finura	4.45	2.65	2.66	2.40

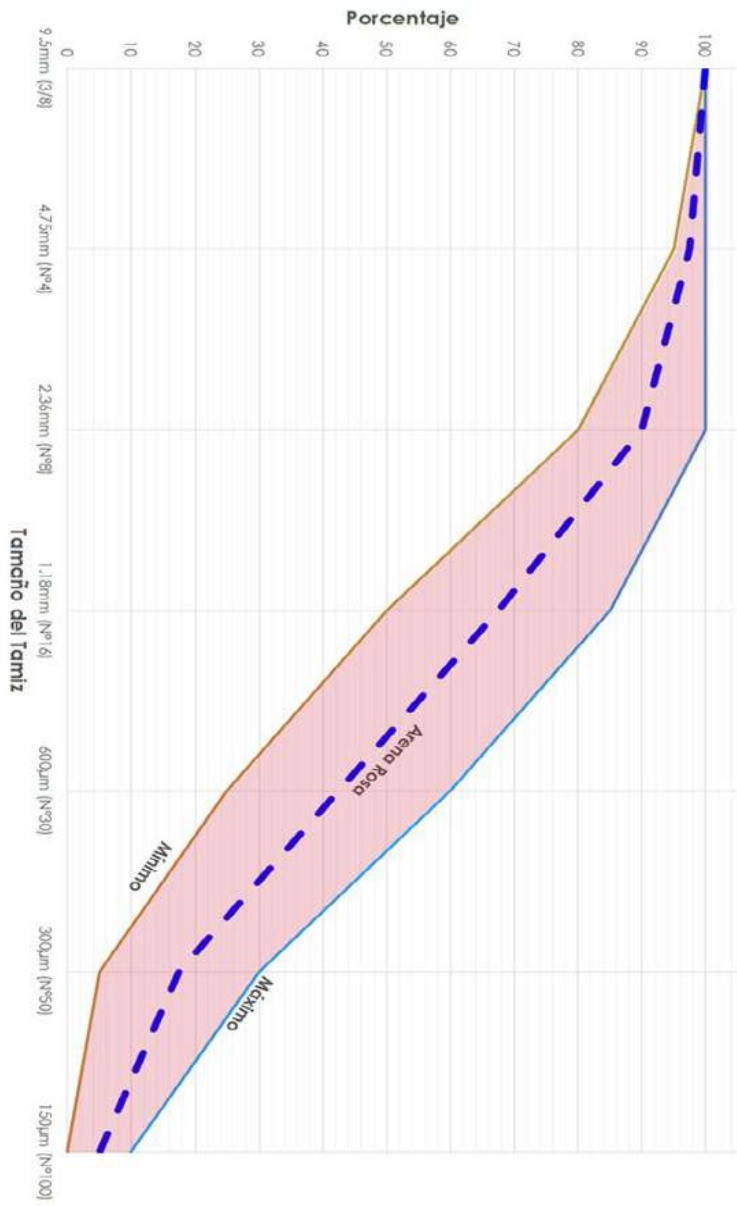
La Gráfica 1 indica los límites máximos y mínimos establecidos por la norma, donde se aprecia que ninguna de las arenas analizadas se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normativa, sin embargo, siguen siendo utilizadas en la industria de la construcción. El módulo de finura de las diferentes arenas se presenta en la Tabla 2

Gráfica 1.

Curva granulométrica de las arenas utilizadas obtenida bajo los parámetros de la norma ASTM C-33.



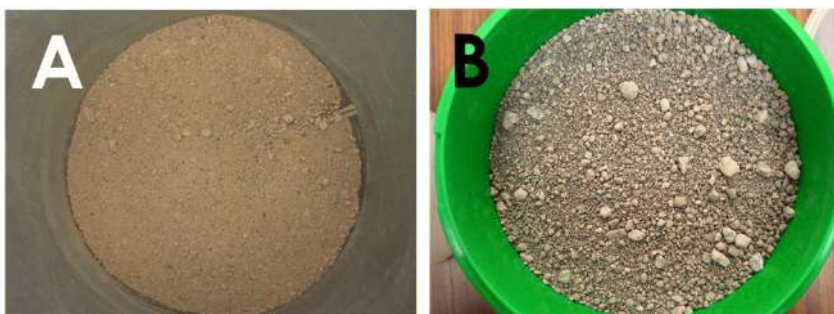
Gráfica 2.
Curva granulométrica modificada de la arena rosa.



Como resultado se obtuvo arena rosa Figura 5, cuya granulometría está dentro de los límites máximos y mínimos, donde es posible apreciar visualmente la diferencia del tamaño y cantidad de granos gruesos y finos, lo anterior podría establecer un criterio para poder determinar si la arena utilizada es muy abundante en finos o, por el contrario, si llegará a carecer de ellos.

Figura 5.

A Arena rosa sin manipulación de su granulometría, B Arena rosa cuya granulometría fue modificada promediando los límites máximos y mínimos establecidos por la norma ASTM C-33



La arena rosa obtenida por medio de tamizado y graduada de acuerdo con los parámetros de la norma ASTM C-33 se implementó en la elaboración de una mezcla de mortero denominada mezcla tamizada (M.T.). Esta mezcla fue sometida a pruebas de compresión a los 28 días, al igual que la mezcla de control (M.C.) donde se utilizó la arena rosa sin alguna modificación en su granulometría con la finalidad de demostrar la influencia de la granulometría del agregado en la resistencia de la mezcla. Adicionalmente se elaboró la denominada mezcla ligera (M.L.) donde se sustituyó un porcentaje de la arena rosa sin modificación en su granulometría, por sílica gel como un medio para disminuir la densidad de la mezcla sin que ello repercuta en la resistencia mecánica de la mezcla.

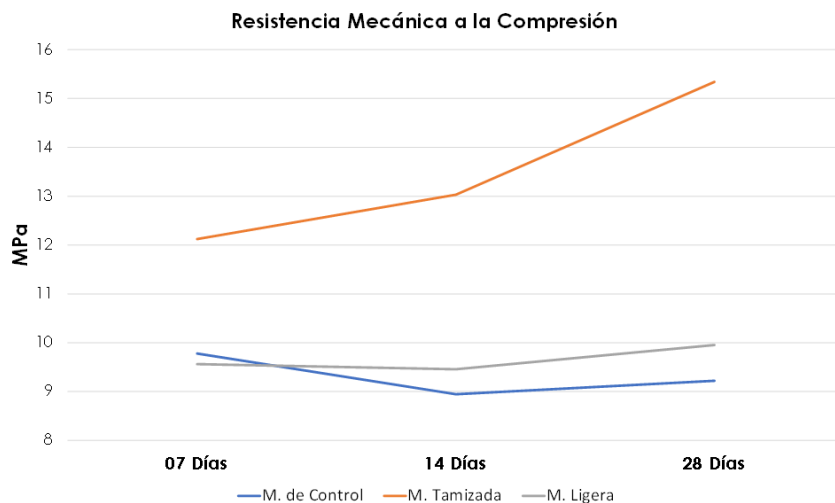
La proporción de dichas mezclas se reporta en la Tabla 3 donde se toma como unidad de medida al cemento.

Tabla 3.
Dosificación de las mezclas analizadas.

Mezcla	Cemento	Arena Sin Tamizar	Arena Tamizada	Sílica Gel	Aditivo	Relación Agua/Cemento
M.C.	I	2.75	N/A	N/A	N/A	0.80
M.T.	I	N/A	2.75	N/A	N/A	0.70
M.L.	I	N/A	1.89	0.86	0.25	0.75

Para las pruebas de compresión se evaluaron: la mezcla de control, la mezcla tamizada y la mezcla ligera a los 7, 14 y 28 días respectivamente (ver Gráfica 3). Los ensayos mecánicos se realizaron cumpliendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM C-109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”.

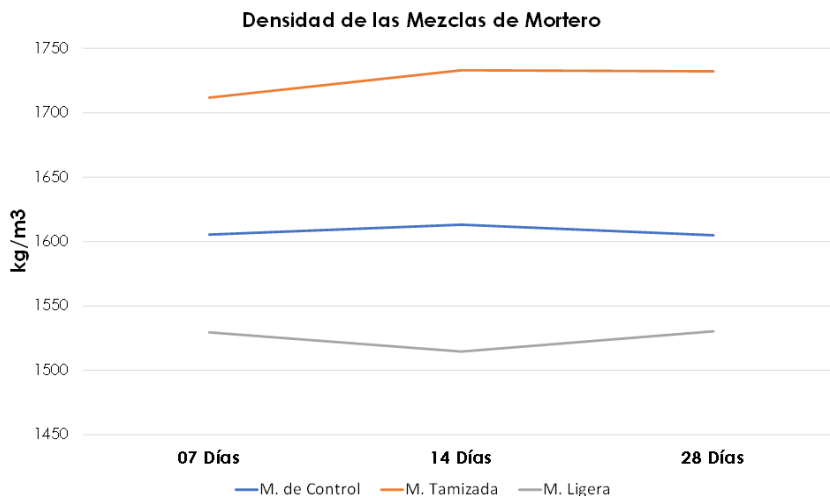
Gráfica 3.
Resistencia a la compresión de las mezclas de mortero.



Antes que las probetas fueran ensayadas, se registraron las densidades de las mezclas para poder determinar el peso volumétrico de éstas y así determinar la ganancia o pérdida de su densidad (ver Gráfica 4).

Gráfica 4

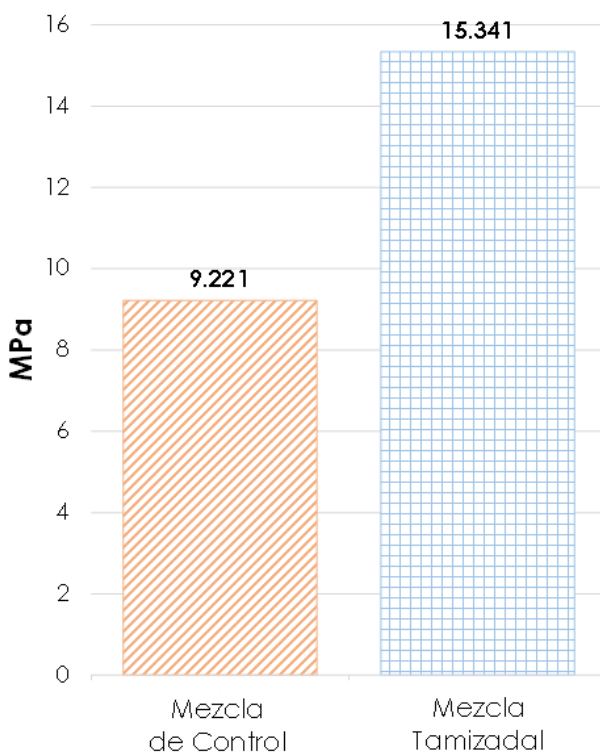
Densidad de las mezclas de mortero por metro cúbico.



En la Gráfica 5 se observan los valores obtenidos de la mezcla de control a los 28 días, la cual fue de 9.221 MPa y la mezcla tamizada de 15.341 MPa, recordemos que la única variable entre estas mezclas es la granulometría de la arena. El incremento en la resistencia mecánica de la mezcla tamizada en relación con la mezcla de control a los 28 días es del 66.37%. Lo anterior significa que, para incrementar la resistencia de las mezclas, no necesariamente se tiene que recurrir a la implementación de aditivos, una opción sería analizar la granulometría de los agregados, buscando que sean lo más próximos a lo establecido por la normativa. Razón por la cual, para el diseño de mezcla ligera, se utilizó arena debidamente graduada. Se reconoce, además, que los agregados deberán de estar libres de materia orgánica y sales entre las cuales se encuentran los nitratos, sulfatos o cloruros. Al utilizar una arena cuya granulometría se encuentre dentro de los parámetros, se modificará la relación agua-cemento, como se pudo apreciar en este trabajo (ver Tabla 3).

Gráfica 5.

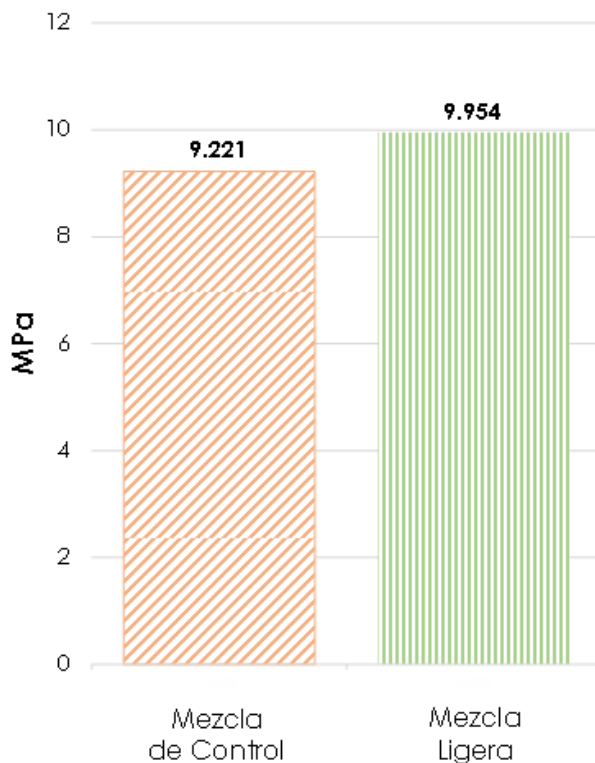
Resistencia a la compresión simple de la mezcla de control y la mezcla tamizada a los 28 días.



Para la elaboración de la mezcla ligera se implementó la arena tamizada, sustituyendo un porcentaje de ésta por sílica gel, con la finalidad de obtener una mezcla con menor densidad y evitar una pérdida en la resistencia. En la Gráfica 6 se registran los valores obtenidos en la prueba de compresión, donde la mezcla ligera tuvo un incremento del 7.94% en relación con la mezcla de control, al registrar un esfuerzo máximo de 9.954 MPa, en contraste con el 9.221 MPa obtenido por la mezcla de control, lo anterior representa un incremento de 7.94% en la resistencia de la mezcla ligera en contraste de la mezcla de control.

Gráfica 6

Resistencia a la compresión simple de la mezcla de control y la mezcla ligera a los 28 días.



La normatividad indica que un tabique de barro recocido deberá tener una resistencia mínima de 6 MPa y un tabique de cemento-arena tendrá una resistencia mínima de 10 MPa. Por lo anterior, se puede determinar que la resistencia de las tres mezclas evaluadas cumple con los requerimientos para utilizarse como sustitución de los tabiques de barro recocido por resistencia. No obstante, solo la mezcla tamizada supera la resistencia de los tabiques cemento-arena (ver Gráfica 7). Para observar el comportamiento físico de las muestras después de ser ensayadas, se programó el equipo para detenerse una vez que la probeta tuviera una pérdida del

40% de la carga máxima, con la finalidad de poder determinar la relación entre la resistencia y la fragilidad del material.

La Figura 6 muestra el estado físico de las muestras después de la prueba de compresión, donde es posible determinar la pérdida de material posterior al ensayo mecánico. Con lo anterior, se observa que la mezcla de control es la que menor resistencia mecánica presentó (ver Gráfica 7) y en cuestiones físicas es la mezcla que mayor desprendimiento de material presentó. La mezcla tamizada obtuvo un incremento en la resistencia del 66%, respecto a la mezcla de control, se observa un menor desprendimiento del material; sin embargo, se siguen presentando las grietas a lo largo de la probeta. La mezcla ligera presentó un incremento del 8% en la resistencia en comparación con la mezcla de control, pero es la mezcla que presenta el menor grado de pérdida de material por desprendimiento.

En las pruebas de compresión se observó que la resistencia máxima de la mezcla ligera es 8% mayor a la obtenida por la mezcla de control. Sin embargo, lo anterior no es un parámetro que permita establecer que las deformaciones de ambos materiales bajo pruebas de compresión sean las mismas, por lo cual fue necesario graficar y comparar las curvas de la mezcla de control y la mezcla ligera, identificando las distintas regiones de la gráfica esfuerzo-deformación (Nilson, 2001).

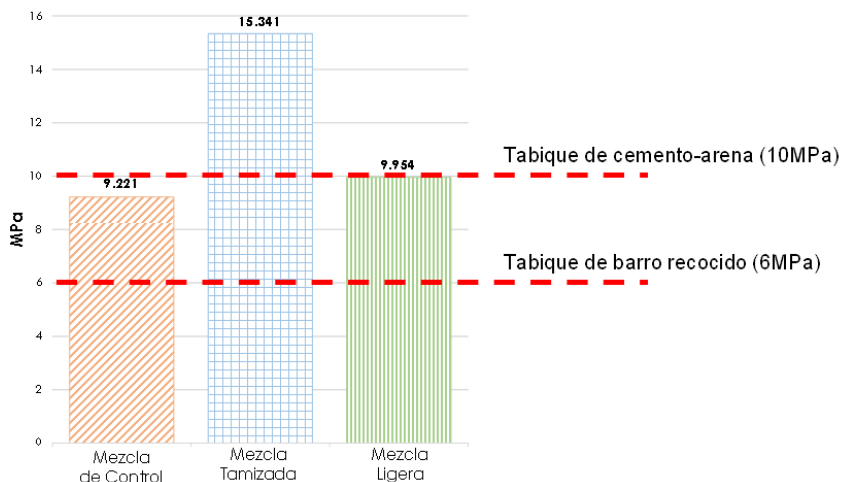
Figura 6.

Deformación de las mezclas después de haber perdido el 40% de su resistencia con relación a la carga máxima obtenida.



Gráfica 7.

Análisis comparativo de la resistencia de las mezclas y los requerimientos mecánicos de las mamposterías.

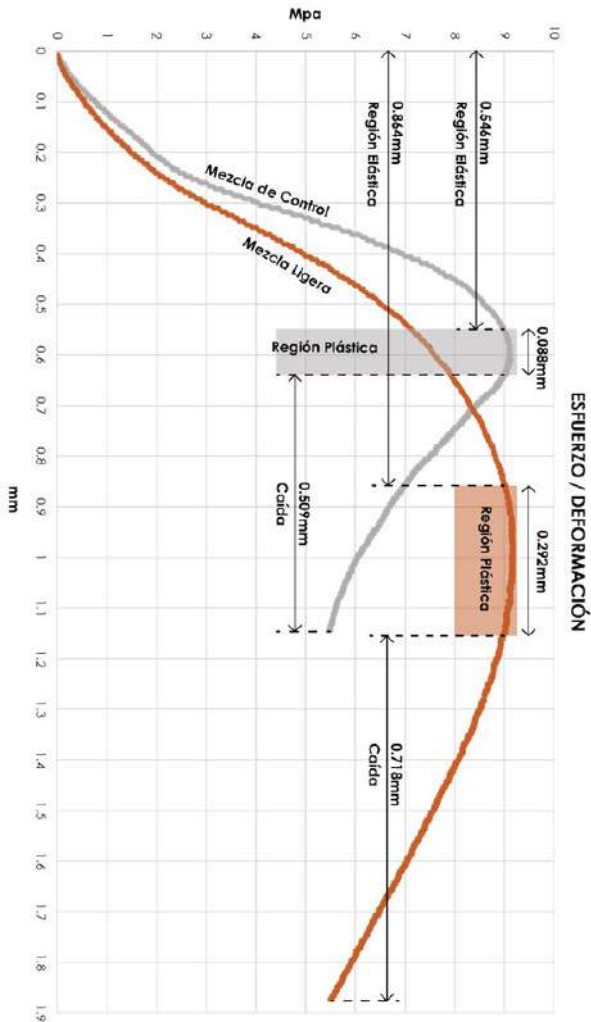


En la Gráfica 8 se presentan las curvas obtenidas de la mezcla de control y la mezcla ligera, como se observó en las pruebas de compresión, la resistencia entre la mezcla de control y la mezcla ligera tiene una variación próxima al 8%, razón por la cual las crestas o punto máximo de ruptura de las curvas se encuentran visualmente a la misma altura. Sin embargo, un aspecto muy importante a resaltar es la manera en la cual las regiones elásticas y plásticas de las mezclas se comportan de manera distinta.

Al comparar las deformaciones que sufren las distintas mezclas, se observa que, ambas resisten cargas muy similares; sin embargo, la región elástica de la mezcla ligera se prolonga un 50% más en comparación con la mezcla de control pasando de 0.54mm a 0.86mm. Lo anterior nos indica que la deformación reversible de la mezcla ligera es mayor. La región plástica de la mezcla ligera es dos veces la obtenida en la mezcla de control pasando de 0.088mm a 0.29mm, lo que confirma que una mezcla ligera tendrá una mayor región plástica o será más dúctil (Nilson, 2001).

Gráfica 8.

Comparativa entre la gráfica esfuerzo deformación de la mezcla de control y la mezcla ligera, obtenidas de las pruebas de compresión a los 28 días



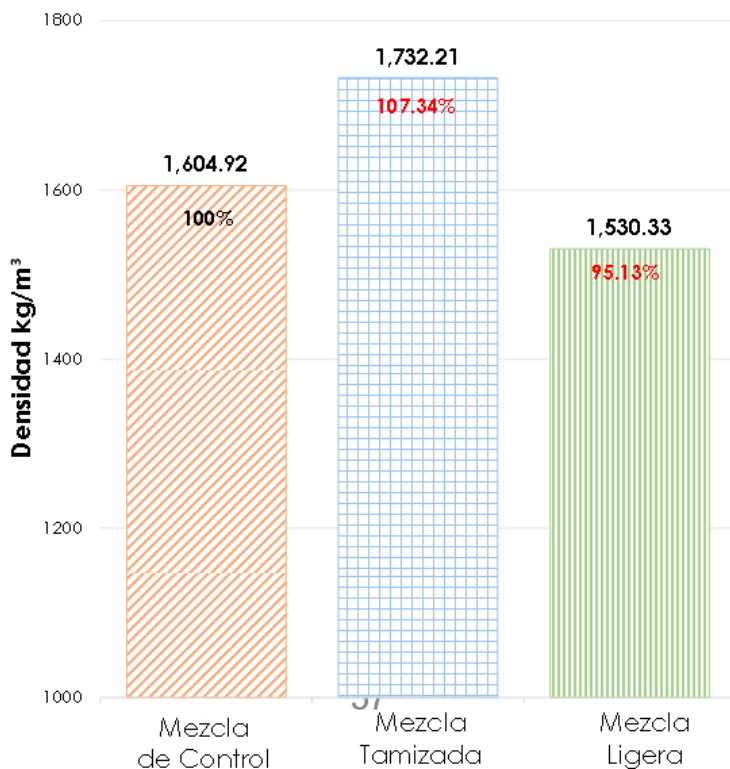
El segundo aspecto de mayor peso es conocer la relación de la densidad por m^3 de las mezclas, y cotejar los resultados con su resistencia obtenida. La literatura nos indica que la densidad de un material está ligada a su resistencia, por lo que las mezclas con mayor resistencia serán de mayor peso volumétrico. En la Gráfica 3 se analizaron los incrementos en la resis-

tencia de la mezcla tamizada y mezcla ligera con respecto a la mezcla de control, detectando un incremento del 66.37% y 7.94% respectivamente.

En la Gráfica 9 se reportan los pesos por m^3 de las mezclas, tomando como el 100% lo registrado en la mezcla de control, la mezcla tamizada tuvo un incremento del 7.34% llegando a pesar $1,732\text{kg}/\text{m}^3$, donde se cumple el argumento que, a mayor resistencia será mayor la densidad. Algo que no sucede con la mezcla ligera, ya que ésta reportó un incremento en su resistencia del 7.94% y un decremento en su densidad del 4.87%, pesando $1,530.33\text{ kg}/\text{m}^3$. Si bien estos valores no reflejan una marcada diferencia, logran mostrar una mezcla donde su resistencia será mayor mientras que su densidad se ve disminuida.

Gráfica 9.

Densidad por m^3 de las mezclas a los 28 días



Los valores de densidad y resistencia mecánica reportados por un productor de piezas de mampostería de cemento-arena indican que una pieza de 14.3cm x 20cm x 39.5cm tiene un peso de 23.4kg. Esta información sugiere que el material con el cual se fabrican estas piezas tiene un peso de 2,071.34 kg/m³ y una resistencia de 60 kg/cm², al contrastar estos resultados con los obtenidos en la mezcla ligera, nos encontramos que al utilizar una mezcla aligerada con partículas de sílica gel para la fabricación de piezas de mampostería, se tendría una disminución en la densidad de las piezas del 26.11% pasando de 2,071.34 kg/m³ a 1,530.33 kg/m³ y un incremento en la resistencia de 68.33% pasando de 60kg/cm² a 101 kg/cm².

Contrastando la información de densidad y resistencia mecánica de la mezcla ligera con una mampostería comercial, es posible apreciar las diferencias entre ellas. Encontramos que las piezas de mampostería presentan otros valores, donde el peso por m² de construcción es de 292.5 kg y se oferta una resistencia de 60kg/cm². Al comparar estos valores con los obtenidos en la investigación, se observa que la resistencia ofrecida por el diseño de mezcla es 68% mayor que la ofrecida por el block convencional y la densidad por m² de construcción se reduce en un 35% pasando de 292.5 kg que ofrece el fabricante a 216.25 kg que se obtienen con la mezcla ligera propuesta.

Figura 7.

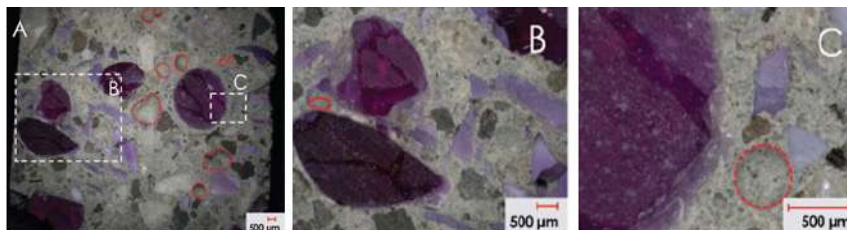
Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada:
A Mezcla de control a 30X, B Región a 100X, C Región a 150X.



En la Figura 7 se aprecia como los elementos de mayor tamaño se distribuyen homogéneamente, en la Figura B y C se observa que, a pesar de que las partículas de la arena se encuentran muy próximas unas de otras, la matriz cementante las rodea perfectamente, por lo que se observa una integración de los agregados, sin generación de cavidades.

Figura 8.

Corte de la mezcla ligera sin haber sido ensayada:
A Mezcla ligera a 20X, B Región a 50X, C Región a 150X.



En la Figura 8 se puede observar con mayor detalle que las partículas de sílica tienen distintas tonalidades, como consecuencia de la humedad que aún conservan en su interior, ya que al ser de tamaños más pequeños la pérdida de ésta es más rápido, contrario a lo que sucede con los elementos de mayor tamaño. En la Figura 8 C se observa cómo la esfera de sílica es rodeada por un elemento que no se observó en las mezclas de control, al no rodear la arena que se encuentra próxima a las partículas de sílica, supone que es una reacción propia de este material, la literatura se refiere a esta zona como zona interfacial o zona de transición.

Figura 9.

Sección de la mezcla ligera ensayada a 28 días:
A Mezcla ligera a 30X, B Región a 100X, C Región a 200X.

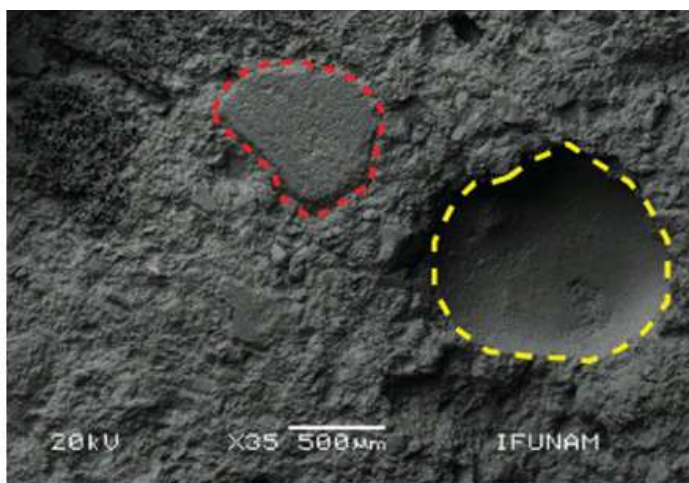


En la Figura 9 B se siguen observando una cantidad considerable de poros, tal como se apreció en la muestra no ensayada; sin embargo, en este caso se alcanza a apreciar una clara concentración de estas cavidades alrededor de los granos de sílica de mayor tamaño. Tal como se encontró en la Figura 9, donde se analizó una sección de mezcla ligera sin haber

sido sometida a una prueba de compresión, en las figuras 9 A y 9 B se observa la aparición de cavidades o porosidad y una disminución en la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de sílica gel, como una consecuencia por la forma esférica y superficie lisa que presenta este material (Neville, 2013; Gutiérrez de López, 2003). En la Figura 9 C se observa una sección casi perfecta en forma circular, lo cual hace suponer que en ese punto se encontraba una partícula de sílica en forma esférica. Hay que recordar que la sílica se comercializa en formas esférica, razón por la cual se trituro para obtener formas irregulares; sin embargo, no fue posible obtener una superficie porosa, viéndose reducida la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento.

Figura 10.

Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada observada en bajo vacío.

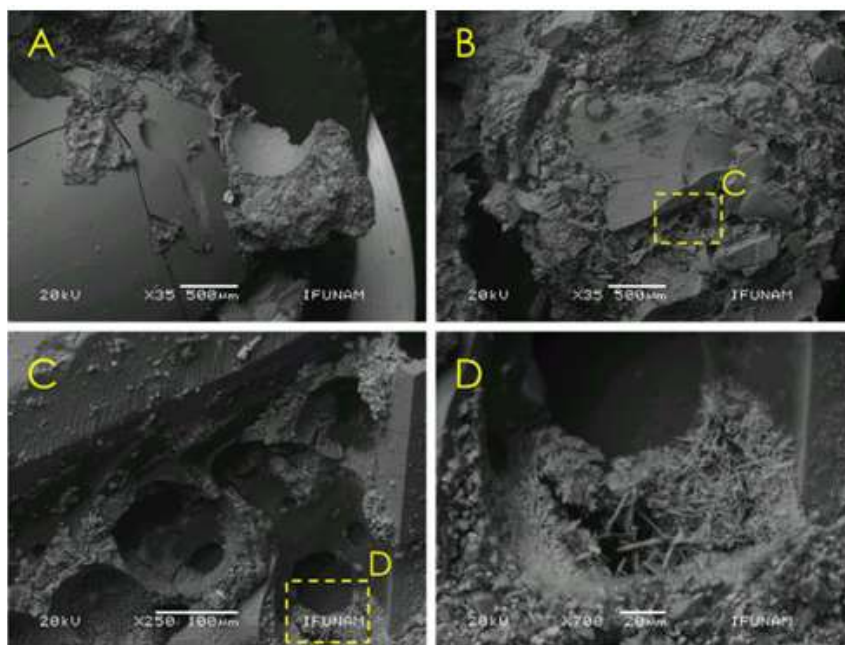


La Figura 10 corresponde a la mezcla de control que no fue ensayada a prueba de compresión, lo que permitió seccionar la muestra por medio de un corte longitudinal. Por el diseño de esta mezcla únicamente se aprecian las partículas de arena, la cual se encuentra marcada con la línea de color rojo. A diferencia de la microscopia óptica, ahora si es posible apreciar la existencia de porosidad en la muestra, indicada con línea amarilla.

Sin embargo, esta porosidad no es causada por el desprendimiento de algún agregado, en este caso el poro es consecuencia de una burbuja de aire, el cual queda atrapado al momento de vaciar la mezcla al molde. La resistencia de las mezclas se encuentra relacionada al volumen de vacíos en su interior, aplicando esta relación únicamente a pasta de cemento o mortero.

Figura 11.

Mezcla Ligera ensayada a los 28 días: A Observado a 35X, B Observado a 35X, C Observado a 250X y D Observado a 700X.



En la Figura 11A se aprecia la superficie de la sílica en forma circular, la cual carece de rugosidad, dificultando la adherencia con la pasta de cemento, separándose de la matriz cementante completamente, como se observa del lado derecho de la misma Figura, dejando una cavidad con una forma casi esférica. La Figura 11 B es la misma toma que se aprecia en la Figura 11 C, donde la microscopía óptica nos indicaba la existencia de porosidad en la mezcla. En las figuras 11C y 11D es posible observar lo

que se encuentra al interior de estos poros, evidenciando la formación de cristales como consecuencia del proceso de hidratación del cemento, con ello se puede argumentar que la adición de sílica a las mezclas no interfiere con dichas reacciones.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos a partir de la experimentación y de su comparación con los objetivos y la hipótesis planteada, las conclusiones de este trabajo son las siguientes: 1) Al sustituir una tercera parte del volumen de arena por sílica gel se obtienen los mejores resultados de trabajabilidad en la mezcla ligera. 2) Se obtuvo un incremento de 7.94% en la resistencia de la mezcla ligera pasando de 9.221 MPa a 9.954 MPa, y una disminución de 4.87% en la densidad respecto a la mezcla de control pasando de 1,604.92 kg/m³ a 1,530.33 kg/m³. 3) Es necesario utilizar un aditivo para contrarrestar la ganancia de humedad que presenta la sílica gel al utilizarse como agregado en la mezcla ligera. 4) La mezcla que contiene sílica presentó un menor desprendimiento de material después de ser sometida a las pruebas de compresión, mientras que la mezcla de control se fractura y se fragmenta completamente. 5) El comportamiento plástico de la mezcla ligera con sílica gel fue notablemente mayor que el comportamiento de las otras mezclas que se ensayaron mecánicamente. 6) Las arenas rosa y gris que se comercializan en la ciudad de México y la zona metropolitana para su uso en la industria de la construcción se encuentran fuera de los parámetros de granulometría que establece la normativa. 7) Al utilizar una arena rosa perfectamente graduada se incrementa la resistencia de las mezclas de mortero a pruebas de compresión hasta en un 66% en comparación con una mezcla con arena cuya granulometría no está controlada. 8) La resistencia de la mezcla ligera, donde se sustituye un porcentaje del volumen de arena por sílica como material aligerante, permite su empleo para la elaboración de piezas de mampostería, ya que su resistencia es solo un 0.46% menor que el valor de bloques de cemento que se establece en el R.C.D.F. para el diseño de elementos de mampostería. 9) A través de las observaciones de microscopía óptica y de microscopía electrónica de barrido de la región interfacial entre el agregado y la pasta de cemento, se determina que la adición de sílica gel

favorece e incrementa el desarrollo de las fases hidratadas de esta región, con lo que aumenta la resistencia del material a esfuerzos de compresión.

10) La densidad por m³ de la mezcla ligera es un 23.48% inferior a la que establece el R.C.D.F. para las piezas de mampostería. 11) La densidad de la mezcla ligera se encuentra un 35.26% por debajo de la densidad de piezas de mampostería comerciales. 12) A partir de conocer las propiedades de los materiales empleados en la mezcla, se diseñaron mezclas menos densas que eventualmente se pueden emplear en la construcción de estructuras de menor sección para los espacios arquitectónicos. 13) El diseño estudiado se consideró únicamente para la elaboración de piezas de mampostería; sin embargo, al combinarlo con otros elementos de refuerzo como el acero, se podría utilizar en la fabricación de paneles para muros o entrepisos o cubiertas, entre otros elementos. 14) El estudio de las propiedades fisicoquímicas de cualquier material de construcción, requiere de los conocimientos y metodologías de otras disciplinas, como las de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Esto permite llevar a cabo trabajos de investigación interdisciplinarios entre expertos de diferentes áreas como la Física, la Química, la Arquitectura y la Ingeniería lo cual redundará en el desarrollo de tecnologías constructivas novedosas.

Referencias

- Akça, K., R. Çakır, Ö İpek, M. (2015). "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Volume 98, 2015, Pages 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>.
- Barbudo, M. A. S., & Borges, P. C. (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. IMCYC.
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Departamento de Ingeniería Civil.
- Mather, B., & Ozyildirim, H. C. (2004). *Cartilla del concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Muciño Vélez, A. (2015), "Endurecimiento de cementos tipo Portland inducido por fosfatos y/o silicatos", Doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

- Neville, A. (2013), Tecnología del concreto. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Nilson, A. H., & Darwin, D. (1999). *Diseño de estructuras de concreto* (pp. 105-121). Colombia: McGraw-Hill.
- Steven H. K. *et al.* (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association

Siembra de partículas submicrométricas de minerales naturales en morteros hidráulicos de cemento

Edrey Nassier Salgado Cruz*
Alberto Muciño Vélez**

Introducción

Según Mehta (2002), la industria del concreto es actualmente la que más usa recursos naturales en el mundo y, por lo tanto, tiene un impacto ambiental considerable. Cada tonelada de cemento Portland requiere alrededor de 1,5 toneladas de materias primas para su producción, y consume cerca de 4000 a 7500 Mega Joules de energía. La producción de cemento Portland es también un contribuidor importante de gases de efecto invernadero, ya que cada tonelada de cemento producida implica la liberación a la atmósfera de alrededor de una tonelada de dióxido de carbono (CO_2). La industria del cemento es, entonces, responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de CO_2 . Por lo tanto, para que la industria del concreto permanezca “sostenible”, debe someterse a algunos cambios significativos en la forma en que especificamos, producimos, utilizamos y reciclamos el concreto.

* Posdoctorante Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación Secihti. nassiersc@outlook.com

** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

Actualmente se han realizado estudios e investigaciones sobre materiales con procedencia de elementos naturales los cuales al ser calcinados tienen una gran capacidad puzolánica, por ejemplo:

Piyanut (2012) estudió los efectos de la Ceniza Fina de Bagazo de Caña con tamaño menor a 45 micras, y su efecto en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión de morteros. Los resultados obtenidos por Piyanut indican que la sustitución de clinker con un 20% de SCBA es apropiado para la producción a escala de laboratorio y con una relación w/c (agua/cemento) de 0.735 se obtiene la adecuada trabajabilidad en sus mezclas realizadas.

Arboláez y Griffin (2005) generaron un estudio sobre la evaluación de la hoja de maíz como posible fuente de material puzolánico en sustitución parcial del cemento Portland, a emplear en las obras de construcción para la elaboración de morteros y concretos, evaluando las características físicas y químicas del material, así como algunas de sus propiedades principales desde el punto de vista constructivo, entre las que destacan la resistencia a la compresión y la durabilidad, concluyendo que el material en estudio posee grandes potencialidades de ser empleado con estos fines, en reemplazos no mayores del 20% de cemento.

A su vez Mahmoud *et al.* (2012) generan una investigación sobre la ceniza de cáscara de cacahuete para utilizarla como reemplazo de cemento en la producción de bloques elaborados con arena y cemento, llegando a la conclusión de que la ceniza de cáscara de cacahuete en menos de un 20% de material puede ser utilizada como reemplazo de cemento; sin embargo, el requerimiento de agua para una buena trabajabilidad en el mortero aumenta.

Kanning *et al.* (2014) establecen la ceniza de hojas de plátano como puzolanas en el cemento Portland para la fabricación de morteros y concretos. Mostrando resultados en los que la resistencia a la compresión, hasta con un 10% de ceniza en la mezcla de mortero, obtuvo casi 25% más resistencia a la compresión que la muestra de referencia, y aproximadamente 10% mayor resistencia a la flexión. Concluyendo que las cenizas de hoja de plátano pueden ser utilizadas como material puzolánico en obras civiles, con ventajas tales como costos más bajos y la reducción equivalente en los impactos ambientales resultantes de la acumulación de este tipo de residuo en el campo.

Chanu y Devi (2013) en su trabajo “Contribución de la Ceniza de Cáscara de Arroz a las Propiedades del Cemento”, RHA por sus siglas en inglés, a las Propiedades del Cemento, Mortero y Concreto, realizó mezclas con reemplazo parcial del cemento, estudiando las propiedades mecánicas del material y llegó a la conclusión de que la sustitución parcial del cemento con RHA reduce la penetración de agua en el concreto por acción capilar en un 20%, además del aumento de la fuerza a la compresión.

Hernández (2011) genera aplanados para muros con 50 y 100% de reemplazo de ceniza de bagazo de caña como agregado, en lo que concluyó que a más ceniza de bagazo de caña la resistencia a la compresión disminuía debido a la porosidad que genera este material, ya que la densidad de las cenizas es menor que de la arena.

Por su parte, Martínez (2007) evaluó la reactividad puzolánica de diferentes materiales como la ceniza de pergamino de café de Huautla de Jiménez, Oaxaca, ceniza volátil, y una arcilla regional del estado de Puebla, así como el estudio de su microestructura en pastas de cemento y mortero, además de evaluar su resistencia mecánica a la compresión en 1, 3, 7, 14 y 28 días; llegando a la conclusión de que la ceniza de pergamino de café tiene poco o nulo valor puzolánico y que la arcilla estudiada generó un impacto positivo en la prueba de compresión.

Cadena (2014) empleó tres materiales de desecho de la industria como: la ceniza de bagazo de caña, la ceniza de cáscara de arroz y la piedra pómez como material de reemplazo en el cemento, en porcentajes de 10, 20 y 30% en mezclas de mortero, evaluando su resistencia a la compresión en edades de 28, 60 y 100 días, concluyendo que las mejores propiedades mecánicas fueron observadas en la mezcla de ceniza de cascara de arroz en un porcentaje de 20% de reemplazo de cemento.

Debido a los problemas medioambientales y la difícil obtención del cemento Portland, nuevos campos de investigación en materiales de carácter natural han sido investigados para su utilización como aditivos o reemplazo de cementos y su utilización en el ámbito de la construcción, tal es el caso de los biocerámicos.

Los trabajos de Tay (2007) así como de Gandolfi *et al.* (2008), Lin *et al.* (2009) y Abmed *et al.* (2014), muestran investigaciones aplicando biocerámicos para elaborar cementos aplicados a la odontología, que, si bien

no son cementos utilizados en la construcción, sí presentan similitudes en sus fases de hidratación que las de un cemento Portland ordinario.

Diseño de las mezclas de mortero

Materiales empleados

Cemento: El cemento utilizado para esta experimentación fue tipo Portland compuesto (CPC) grado 30 R. Este cemento es de gran uso y presencia en el centro de la república mexicana, lo cual hace que sea una de las marcas más utilizadas en la autoconstrucción. Se trata de un material que satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE y la norma norteamericana ASTM C-595.

Fosfato tricálcico de origen natural: Para la generación de las partículas submicrométricas de fosfato tricálcico agregadas a las mezclas de mortero realizadas en esta investigación, se utilizó fosfato tricálcico de origen natural de marca comercial COSMOCEL®, de la empresa Amfher Foods. Tomando como referencia a Vélez (2016), quien concluye que, al adicionar partículas de fosfato tricálcico en pastas de cemento, se observa un aumento en la resistencia a la compresión en tiempos de fraguado cortos.

Arena: La arena “rosa” utilizada en la experimentación fue obtenida en la zona oriente del Estado de México, debido a su gran uso en la autoconstrucción y también por la amplia oferta de este tipo de agregado.

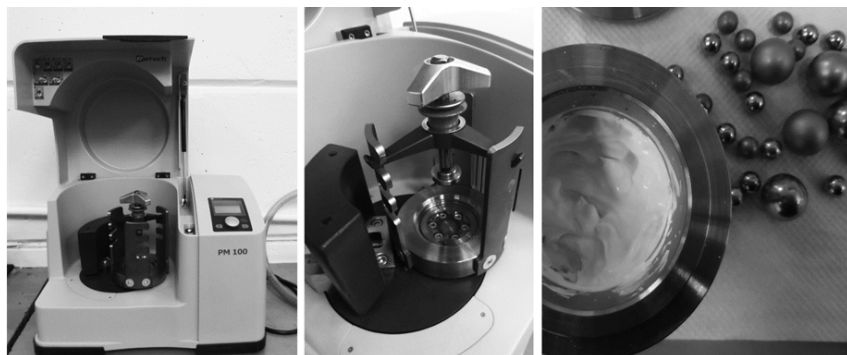
Agua: El agua utilizada en las mezclas de concreto fue obtenida de la toma de agua potable.

Obtención de las partículas submicrométricas

La rutina aplicada para generar el tamaño de las partículas submicrométricas de fosfato tricálcico adicionadas a las mezclas de morteros se realizó por medio de molienda mecánica en un molino de bolas de tipo centrífugo Marca Retsch Modelo PM 100 con tarro y bolas de ágata, cuyas velocidades alcanzan 700 rpm y tienen un tiempo máximo de funcionamiento continuo de 2 horas. En este trabajo de investigación, se pesaron 50 mL de fosfato tricálcico para su posterior vaciado en el tarro y se utilizaron 6 bolas grandes de 2 cm de diámetro y 25 bolas pequeñas de 0.5 cm de diámetro a una velocidad de 600 rpm durante un período de 12 horas de molienda.

Figura 1.

Equipo de molino de bolas de tipo centrífugo Marca Retsch Modelo PM 100 con tarro y bolas de ágata, cuyas velocidades alcanzan 700 rpm y un tiempo máximo de funcionamiento continuo de 2 horas.



Con la disminución de tamaño de partícula se pretende que los procesos de disolución de los reactivos principales sean más rápidos y por tanto que puedan iniciarse los procesos químicos en un tiempo más corto, dando lugar a cementos de fraguado y endurecimiento más rápidos.

La caracterización física de las partículas en polvo para el aditivo se realizó mediante la medida del tamaño y distribución de las partículas.

El procedimiento mediante microscopia electrónica de barrido consistió en fotografiar una muestra representativa del material bien disperso y aplicarle técnicas de análisis de imagen pudiéndose observar directamente su morfología (forma de las partículas) y estimar su tamaño a partir de la imagen bidimensional, para este proceso se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Ultra-Alta Resolución JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope.

Otra técnica realizada para dimensionar las partículas del aditivo fue el análisis mediante un equipo de alta confiabilidad de difracción, el cual emite un haz cuyo flujo es expandido y radiado sobre las partículas suspendidas en un líquido, el proceso consistió en generar un doble disolución con acetona y agua destilada como medios de dispersión de las partículas, las disoluciones fueron alojadas en una mesa de vibración por un lapso de 5 minutos, para finalmente poder hacer un análisis

mediante la refracción y adsorción del material en un equipo Z zeizer con capacidad de medición de 0.02 micras hasta 0.001 nanómetros.

Figura 2.

Obtención de parámetros físicos de las partículas de fosfato cálcico mediante A microscopio óptico y B equipo de difracción Z zeizer.



Elaboración de las mezclas

El diseño de mezclas fue realizado con base en la norma ASTM C-109: “Método de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, usando moldes para especímenes de 2 pulgadas”.

El primer paso de la elaboración de las probetas fue pegar los moldes donde se vaciaría la mezcla, estos moldes fueron diseñados con acrílico transparente (elemento que no hace reacción ante los elementos de la mezcla del mortero) de 1.8 cm de diámetro por 2.5 cm de altura, recubiertos de vaselina para el fácil desmolde del material después de endurecida la mezcla, el pegado de los moldes se realizó con silicón sobre una base de vidrio.

Después de haber fijado los moldes de manera correcta, se procedió a calcular las cantidades de materiales necesarios, estas cantidades fueron obtenidas de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C – 109, la cual establece que para 6 muestras cubicas de 5 cm, de lado con un volumen total de 125 cm³, se necesitan 500 gramos de cemento, 1345 gramos de arena y 242 mililitros de agua, solo se realizaron reglas de tres para la obtención del total de cada material para 7 cm³ que requiere el molde del espécimen.

La norma establece que para obtener la desviación estándar se necesitan generar por lo menos tres probetas para su posterior prueba.

Tabla 1.

Cantidades de mezcla utilizada en los morteros con adición de partículas submicrométricas de fosfato tricálcico natural.

Cantidad de materiales utilizados en las mezclas realizadas para un volumen de 7 cm ³ (volumen del cilindro o de la probeta)			
Cemento	Agregados finos	Agua	PMF
Gramos	Gramos	Mililitros	Gramos
4.67	12.38	3.97	0.047

Pesados los materiales requeridos para las dos probetas, se vaciaron en un vaso de precipitados para homogenizar el cemento, arena y agua, mediante mezclado mecánico, utilizando un vibrador con aspás a 300 rpm (Figura 3 A y B), para disolver las subpartículas micrométricas de fosfato tricálcico en el agua se utilizó una mesa de vibración ultrasónica (c), por último, la mezcla fue vertida en los moldes de acrílico antes descritos.

Figura 3.

Mezclas de mortero realizadas en la investigación.



Ya realizadas las mezclas se vertieron en los moldes para su posterior fraguado y endurecimiento a temperatura y condiciones ambiente.

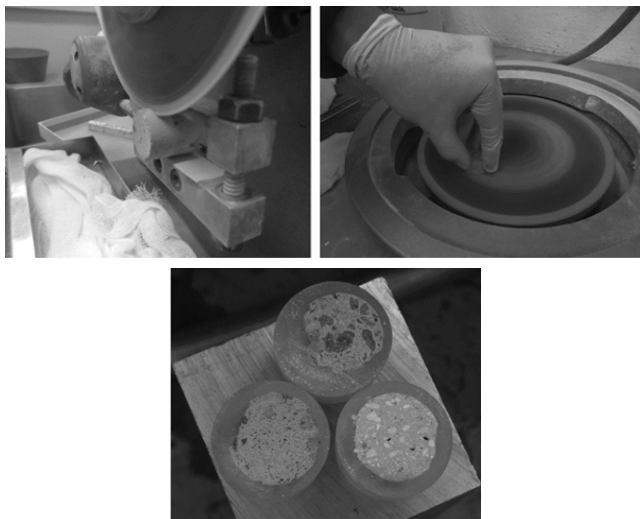
Probetas para microscopia óptica y electrónica de barrido

Las secciones de las probetas preparadas para las microscopias fueron realizadas por corte mecánico siendo lo suficientemente grandes para ser representativas de la masa total de la mezcla.

El proceso para elaborar las pastillas pulidas tipo espejo para la microscopia electrónica de barrido consistió en cortar pastillas de 2 milímetros de espesor de las probetas de mortero, las cuales fueron sometidas a la compresión. Una vez obtenidas las muestras de mortero se embebieron en resina acrílica autopolimerizable, para después ser pasadas por las lijas números 200, 300, 600, 1000 y 1200, así como un pulidor de paño.

Figura 4.

A Corte de las muestras de concreto embebidas en acrílico, B Pulido tipo espejo, C Pastillas para MEB.



Técnicas de caracterización

Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión, al igual que el diseño de mezclas, están basadas en la norma ASTM C 109, la cual establece que las pruebas de compresión deberán ser a los 1, 3, 7, 14 y 28 días de endu-

recimiento. Estas pruebas fueron realizadas en una máquina universal de pruebas mecánicas modelo Shimadsu KN-100, con una velocidad de carga de 1 KN por segundo.

Los especímenes sujetos a la prueba de compresión fueron sumergidos en acetona para congelar las reacciones de fraguado, lo que nos permitió el estudio de fases de hidratación mediante la microestructura cristalina en las edades a las que fueron sometidas. La absorción de la acetona en el interior del cemento poroso elimina el agua sobrante, lo que genera que las mezclas de mortero paren la hidratación. Para realizar la microscopia electrónica de barrido las probetas se secaron a 70°C durante una hora en un horno.

La resistencia a la compresión se obtuvo al promediar el esfuerzo máximo alcanzado de tres probetas, utilizando la formula;

$$F'c = P/A$$

Donde:

F'c = resistencia a la compresión

P = carga máxima aplicada al espécimen

A = área neta.

Figura 5.

Prueba de resistencia a la compresión sobre las probetas de morteros realizados en la investigación.



Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Para el estudio de los morteros realizados en esta investigación se realizó el análisis microestructural del material mediante un microscopio electrónico de barrido de ultra-alta resolución JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope.

Análisis y discusión de resultados

Endurecimiento de morteros elaborados con cemento Portland adicionados con partículas submicrométricas de fosfato tricálcico (TCP) de origen natural

El proceso de endurecimiento de los dos tipos de mezclas de mortero elaboradas, (la primera, con adición de partículas submicrométricas de fosfato tricálcico de origen natural y la segunda, realizada sin adición de fosfato tricálcico sirviendo como mezcla de referencia) se siguió a través de pruebas mecánicas de compresión, Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido, observándose el comportamiento macro y microestructural del material a la edad de 28 días de endurecimiento respectivamente, haciendo énfasis en el efecto de la siembra de partículas submicrométricas de fosfato tricálcico en las mezclas de morteros y cómo afectan éstas en las tres fases antes mencionadas, es decir, en su estructura.

Teniendo la premisa de que al modificar la microestructura del material adicionándole partículas de tamaño nano y submicrométrico se modifican sus características macrométricas, afectando su composición física, química y mecánica, y generando condiciones benéficas para el material.

Análisis de las pruebas de resistencia a la compresión del mortero de referencia y mortero con la adición de partículas submicrométricas de fosfato tricálcico (TCP) de origen natural

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión de los dos tipos de mezclas de mortero realizadas en la experimentación, en función de la variación del esfuerzo máximo en compresión (en el punto de fractura) como función del tiempo transcurrido. Los experimentos se realizaron a los 3, 7, 14 y 28 días; de acuerdo con la norma correspondiente ASTM C 109/C 109M.

Tabla 1.
Análisis estadístico de las pruebas de compresiones realizadas
a las probetas de mezclas de mortero en estudio.

	DATOS		FUNCIONES ESTADÍSTICAS					VARIACIONES DE RESISTENCIA	
	Días de endurecimiento	Núm. De Probeta	Resistencia a la compresión (Mpa)	Media (Mpa)	Resistencia a la compresión en porcentaje (%)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Factor d2	Coefficiente de Variación Corregido
Mezclas de referencia	3 días	Probeta A	15.26	15.3	100	0.39	2.56	1.693	1.51
	3 días	Probeta B	15.71						
	3 días	Probeta C	14.93						
	7 días	Probeta A	22.08	21.56	100	0.92	4.27	1.693	2.52
	7 días	Probeta B	22.11						
	7 días	Probeta C	20.5						
	14 días	Probeta A	22.61	20.83	100	2.3	11.2	1.693	6.61
	14 días	Probeta B	18.19						
	14 días	Probeta C	21.69						
	28 días	Probeta A	20.94	20.23	100	0.98	4.86	1.693	2.87
	28 días	Probeta B	20.65						
	28 días	Probeta C	19.11						

Tabla 1.
Análisis estadístico de las pruebas de compresiones realizadas
a las probetas de mezclas de mortero en estudio.

DATOS			FUNCIONES ESTADISTICAS					VARIACIONES DE RESISTENCIA	
Dias de endurecimiento	Núm. De Probeta	Resistencia a la compresión (Mpa)	Media (Mpa)	Resistencia a la compresión en porcentaje (%)	Desviación Estándar	Coeeficiente de Variación	Factor d2	Coeeficiente de Variación Corregido	
Mezclas de referencia	3 días	Probeta A	18.15	17.06	111.5	1	5.85	1.693	1.51
	3 días	Probeta B	16.19						
	3 días	Probeta C	16.84						
	7 días	Probeta A	20.76	21.27	98.66	0.45	2.12	1.693	1.51
	7 días	Probeta B	21.46						
	7 días	Probeta C	21.6						
	14 días	Probeta A	23.81	23	110.4	0.93	4.02	1.693	1.51
	14 días	Probeta B	23.19						
	14 días	Probeta C	21.99						
	28 días	Probeta A	20.84						
28 días	Probeta B	24.7	23.58	116.54	2.39	10.12	1.693	5.98	
28 días	Probeta C	25.2							

Los resultados obtenidos mediante el mínimo de probetas testeadas de una mezcla (tres probetas por día de endurecimiento), proporcionan datos insuficientes para el análisis estadístico y, como con cualquier estimador estadístico, la confianza en la estimación es una función de la cantidad de resultados de la prueba.

Aunque normalmente el mínimo de muestras para obtener estadísticas confiables en mezclas de concreto es de 30 probetas por día de envejecimiento, cuando se analizan menos de 10 ejemplares se deben realizar las correcciones correspondientes debido a una serie de factores de carácter aleatorio que hacen imposible fabricar dos mezclas exactamente iguales, siendo características presentes en ellas, la no uniformidad y la variabilidad. Para esto se recurre al control estadístico de procesos, en cual se obtiene un coeficiente de variación que puede ser utilizado como un índice del grado de control y el estándar general de la calidad del concreto realizado. La tabla 10, según el ACI Committee 214, muestra el coeficiente de variación que puede esperarse en proyectos vigilados. Las clasificaciones de control se basan en la experiencia adquirida con un gran número de proyectos y se presentan como una guía general para evaluar el control del concreto.

Tabla 2.

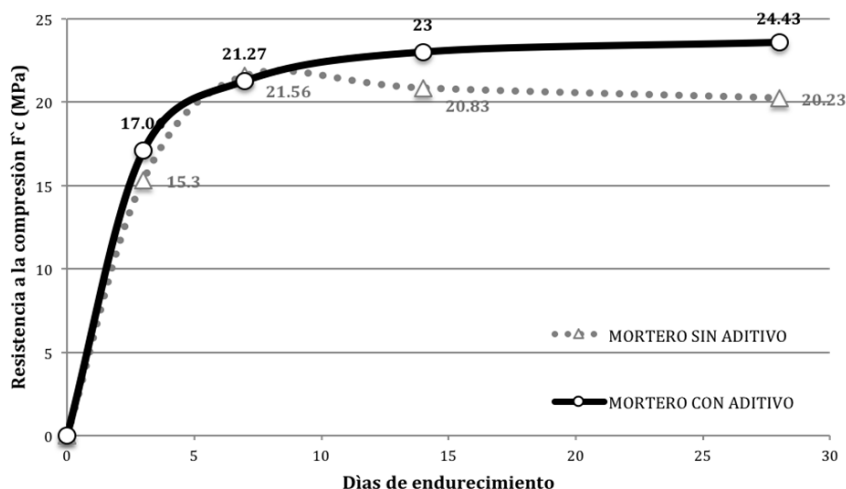
Estándares de control del concreto, ACI committee 214.

Clase de operaciones	Coeficiente de variación para los diferentes estándares de control			
	excelente	bueno	medio	pobre
Variación total:				
(I) construcción en general	inferior a 10.0	10.0 a 15.0	15.0 a 20.0	sobre 20.0
(II) control de laboratorio	inferior a 5.0	5.0 a 7.0	7.0 a 10.0	sobre 10.0
Variaciones dentro de una misma mezcla:				
(I) control en obra	inferior a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	sobre 6.0
(II) control de laboratorio	inferior a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	sobre 5.0

De acuerdo con lo anterior y a los coeficientes de variación obtenidos en los cálculos, podemos indicar que el grado de calidad en las muestras elaboradas en el laboratorio a los 28 días de endurecimiento y llevadas a la prueba de resistencia a la compresión, están percibidas con una excelente y buena calidad de mezcla de concreto y grado de control, para las mezclas con aditivo y las mezclas de referencia respectivamente.

Gráfica 1.

Resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 días de endurecimiento de las mezclas de mortero con aditivo y de referencia.



En la Gráfica 1 se ilustra el endurecimiento de los morteros de cemento de referencia (línea punteada y triángulos) y los morteros de cemento con aditivo (línea continua y círculos) versus la resistencia a la compresión alcanzada, observándose tres aspectos importantes de estos datos;

El primero es el aumento de la resistencia a la compresión en mezclas con aditivo a los 28 días de endurecimiento, los cuales obtuvieron una media de 24.43 MPa, 20 por ciento más resistencia a la compresión con respecto a las mezclas de referencia, que obtuvieron una media de 20.23 MPa), incrementando su resistencia mecánica de forma significativa en los morteros con aditivo.

El segundo punto de importancia es la obtención de resistencias máximas a la compresión en la edad de 14 días, generando un endurecimiento rápido.

El tercer aspecto importante es la obtención de morteros con resistencias a la compresión mayores a las que debe cumplir un mortero de uso estructural tipo I (18.8 MPa) según los requisitos que establece la norma mexicana NMX-C-486, y acercándose en demasía a la resistencia a la compresión (25 MPa) de concretos estructurales clase I, establecido en el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.

Las investigaciones precedentes realizadas por Velez (2010), concluyen en sus pruebas realizadas a dos diferentes tipos de pastas de cemento a la edad de 38 días de endurecimiento un aumento en un 14% de resistencia a la compresión con respecto a las mezclas de referencia. En contraste, en la presente investigación realizada con agregados finos o arenas para mezclas de mortero y con el uso del mismo aditivo, de igual manera se ve un incremento en la resistencia a la compresión. Comparando ambos estudios de Resistencia en diferentes tiempos de endurecimiento, se observa un comportamiento parecido en los materiales (pastas de cemento y morteros).

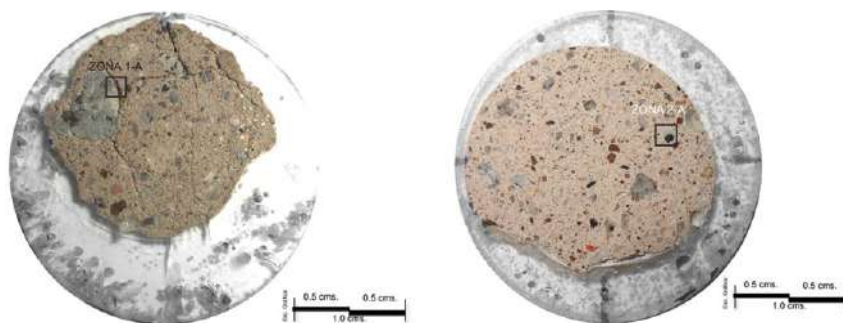
Lo anterior muestra que, al adicionar partículas submicrométricas de fosfato tricálcico de origen natural en las mezclas de mortero, ayuda en el incremento de resistencias a la compresión del material en tiempos de endurecimiento más cortos.

Macroestructura de los morteros; microscopia óptica a los 28 días de endurecimiento

En la Figura 6 se muestran dos secciones pulidas tipo espejo de los morteros sin aditivo (Figura 6 A) y los Morteros con aditivo (Figura 6 B), ambas fueron embebidas en resina epóxica para facilitar el proceso de pulido. A simple vista, se pueden apreciar las diferencias en la macroestructura de ambos morteros. Por ejemplo, el tamaño y la distribución de partículas es más homogénea en el mortero con aditivo (Figura 6-B), que en el mortero sin aditivo (Figura 6 A), en particular, en el mortero sin aditivo, en la parte superior izquierda aparece una zona gris de gran tamaño, a partir de la cual surgen dos grandes grietas que recorren toda la sección de la muestra. En la muestra con aditivo también se observan ese tipo de zonas grises, pero son de menor tamaño y están distribuidas más homogéneamente, además, el proceso de agrietamiento no es tan claro como en la muestra sin aditivo. Lo mismo se observa con la distribución de los agregados finos que aparecen con coloración variable debido a sus diferentes composiciones mineralógicas.

Figura 6.

Aspecto de la estructura de dos secciones de los Morteros estudiados a 28 días de endurecimiento, Figura A Mortero sin aditivo, Figura B Mortero con aditivo PMF.



Analizaremos ahora con más detalle y a mayor amplificación de Figura, las zonas marcadas como 1 A y 2 A en la Figura 6. Escogimos estas zonas debido a que en ellas se aprecian las tres fases en este tipo de materiales, es decir, la fase pasta de cemento, la fase de agregados y la Zona Interfacial de Transición (ITZ por sus siglas en inglés).

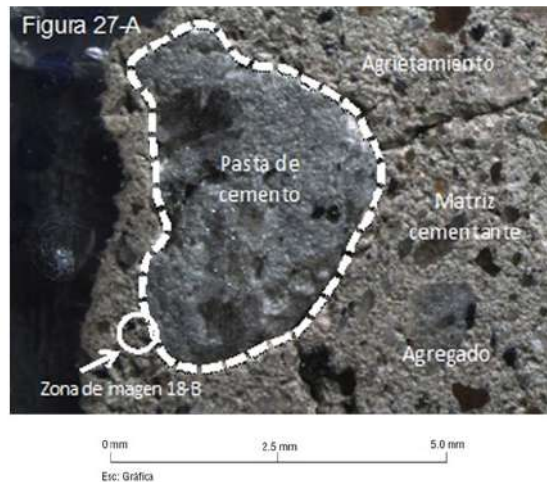
Macroestructura de los morteros sin aditivo; microscopia óptica a los 28 días de endurecimiento, zona 1 A

Iniciamos con la zona marcada como 1 A, en donde se observa una región grisácea que al parecer corresponde a un cúmulo de pasta de cemento. Primero analizaremos las imágenes de microscopia óptica (ver Imágenes 7A y 7B) y, posteriormente, las imágenes de microscopia electrónica de barrido (ver Imágenes 8 A, B, C y D).

La zona grisácea aparece inmersa en un conglomerado de agregados pétreos mezclados con material cementante básicamente formado por C-S-H (Figura 7 A) y aunque en general parece haber un buen acoplamiento de este cúmulo con el resto de los materiales del Mortero (ver Figura 7 B), alrededor de esta zona es evidente la presencia de al menos dos sitios de nucleación de grietas de gran tamaño, lo que indica la presencia de puntos altamente débiles en la región de acoplamiento ITZ de la pasta de Cemento con el resto de los materiales. El análisis mediante microscopia electrónica de barrido confirma esto último, como veremos a continuación.

Figura 7.

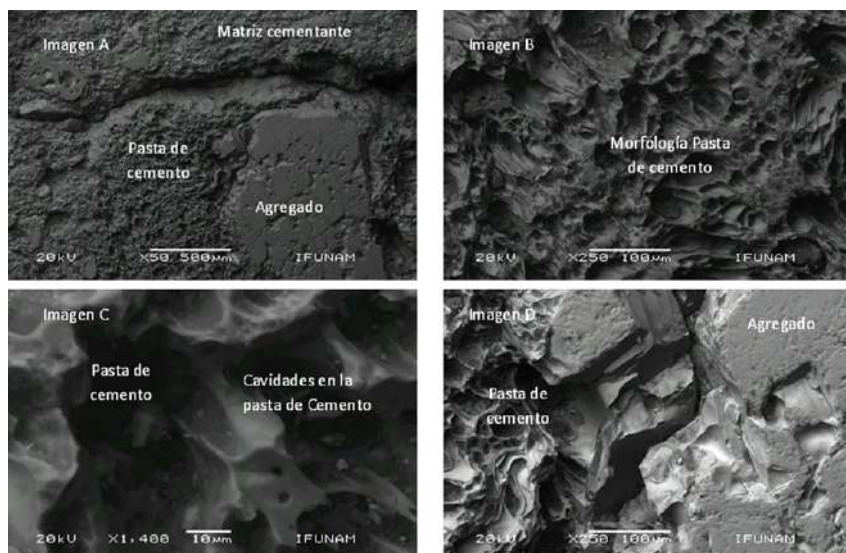
Microscopia óptica a los 28 días de endurecimiento de la mezcla de Mortero sin aditivo Zona 1A, Arriba (7 A). Limitada por una línea punteada aparece una zona gris que podría corresponder a un cúmulo de pasta de Cemento. La imagen inferior Figura (7 B) corresponde al punto marcado con una flecha en la imagen de la Izquierda amplificado. Este punto corresponde a una zona de transición.



Microestructura de los morteros sin aditivo; microscopía electrónica de barrido a los 28 días de endurecimiento, zona 1 A

Figura 8.

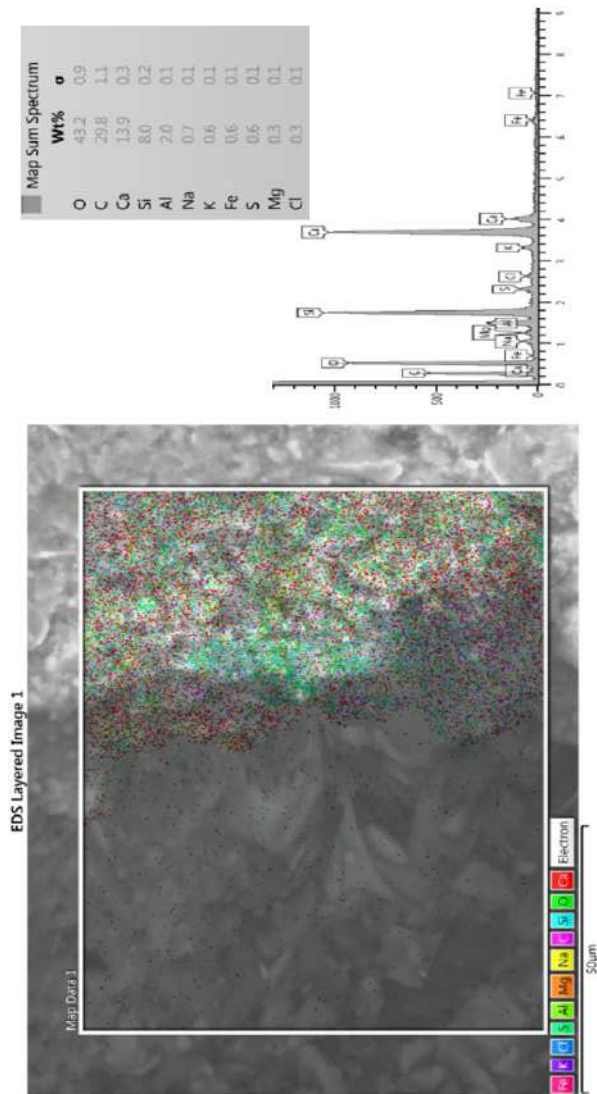
Imágenes de microscopías electrónicas de barrido en la zona 1 A tomadas en la muestra de mortero sin aditivo a los 28 días de endurecimiento.



La Figura 8 A muestra la microestructura en un punto de la zona 1 A cercana al inicio de una grieta. En esta imagen, aparecen un agregado, una región correspondiente al cúmulo de pasta de Cemento y las grietas que se forman en la interface de estos dos materiales. En las figuras B y C, aparece con más detalle la estructura del cúmulo de la pasta de Cemento, en ella se aprecia la presencia de una alta densidad de poros con tamaños superiores a $30\ \mu\text{m}$. Finalmente, en la Figura D se observa la interfaz (ITZ) entre la pasta y el agregado con gran cantidad de grietas. Por otra parte, el análisis elemental mediante Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS por sus siglas en inglés) entre la interfaz de la pasta de cemento y el agregado indica una alta concentración de Silicatos, ya que la relación Ca/Si es del orden de 0.13 (Figura 9). Esto sugiere que en esa región debe haber poco aglutinante del tipo C-S-H, ya que para que este

gel se forme, la relación Ca/Si debe estar entre 1.5 y 2. Estos resultados nos llevan a la conclusión de que la fragilidad que se observa en la zona estudiada se debe a la alta porosidad observada en la pasta de Cemento y a la poca adherencia de ésta, con los agregados, por la poca presencia de material cementante C-S-H.

Figura 9. Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la interfaz de la zona de estudio 1-A.



Pasamos a analizar ahora la zona 2 A (ver Figura 6 B) correspondiente al mortero con aditivo PMF. En este caso tenemos también un aglomerado de pasta de cemento junto a un agregado (ver Figura 10). Como en el caso anterior, la zona fue analizada mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (ver figuras II A, B, C y D)

Macroestructura de los morteros con aditivo; microscopía óptica a los 28 días de endurecimiento, zona 2-A

Figura 10.

Imagen de microscopía óptica a los 28 días de endurecimiento de la mezcla de Mortero con aditivo (Figura 6, zona 2 A).

La región encerada por la línea punteada corresponde a un cúmulo de pasta de cemento.

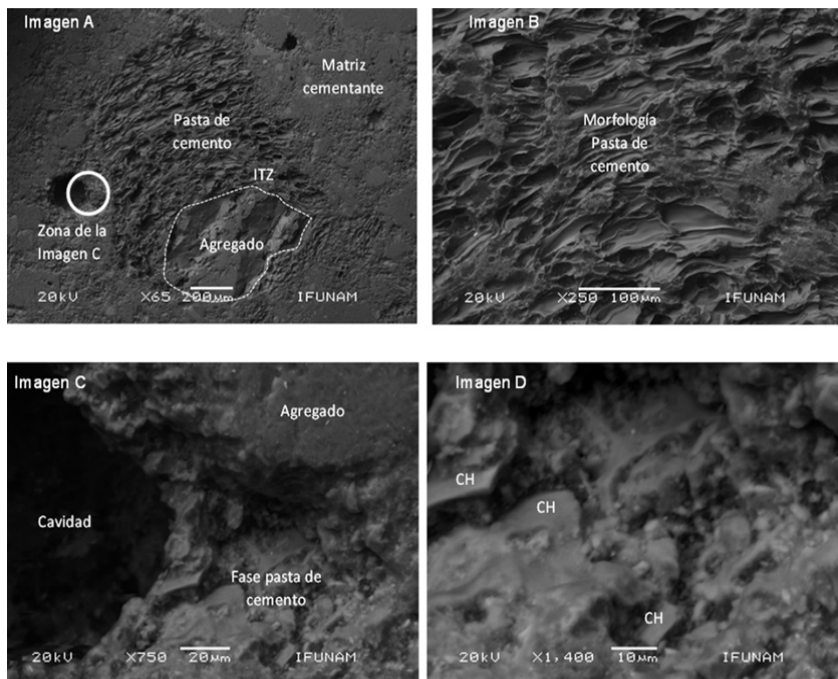


En la Figura 10 se observa una zona de pasta de cemento de mucho menores dimensiones que las que se observa en el mortero sin aditivo. En este caso no se observan regiones de inicio de agrietamiento en la frontera que separa a la pasta y al agregado. También se observan limos y arcillas en combinación con fases hidratadas de cemento y embebidos aparecen agregados de colores café, negro y ocre.

Microestructura de los morteros con aditivo; microscopía electrónica de barrido a los 28 días de endurecimiento, zona 2-A.

Figura 11.

Imágenes de microscopías electrónicas de barrido en la zona 2-A tomadas en la muestra de mortero con aditivo a los 28 días de endurecimiento.



A mayor ampliación mediante el empleo de Microscopías Electrónicas de Barrido se puede hacer un análisis más detallado de la zona 2 A. En la Figura 11 A, se aprecian varios elementos interesantes de la microestructura. En primer término, junto al cúmulo de pasta de Cemento y el agregado, aparecen dos pequeñas cavidades (a la izquierda y arriba a la derecha de la imagen) que parecen tener su origen en el desprendimiento de dos pequeños agregados durante el proceso de pulido. Como ya mencionamos, no se ven grietas nucleadas a partir de la frontera que separa a la pasta del agregado, esto sugiere mayor fortaleza en el acoplamiento de estos dos materiales del mortero. Además, en la superficie de la pasta de cemento se detectan cavidades menos profundas y con menos rugosidades que las observadas en el mortero sin aditivo.

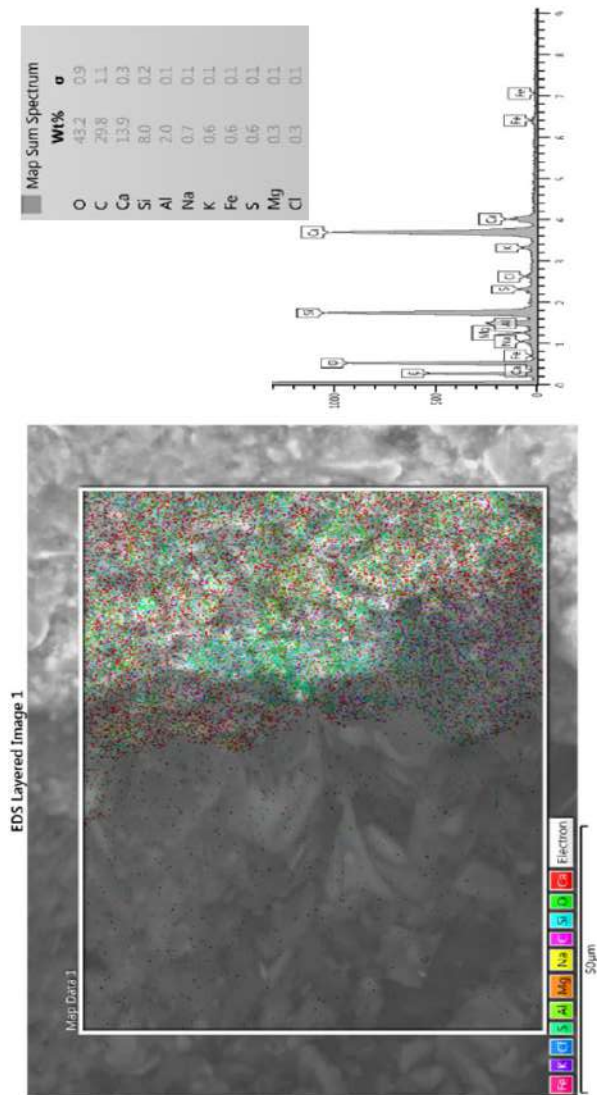
La porosidad marcada con un círculo en la Figura 11A nos permitió hacer un análisis detallado de la zona de contacto entre esos agregados y la matriz cementante. En la Figura 11 C aparece a mayor ampliación la cavidad marcada en la Figura 11 A. Al ampliar el borde de esta zona hasta 1400 aumentos (ver Figura 11 D), claramente se detectan objetos con morfologías similares a las fases de hidratación CH y C-S-H (véase a Liu *et al.*, 2003).

En este caso, para los morteros elaborados con Aditivo de PMF-, también se realizó un análisis por Espectrometría de Dispersión de Energías (EDS) de la muestra. La zona de análisis fue el borde de la cavidad dejada por el desprendimiento de agregado pequeño (ver Figura 11 C). En la Figura 12, aparecen registrados los resultados del análisis, a partir de estos, se encuentra que la relación Ca/Si es del orden de 1.73. De acuerdo a varios autores esto indicaría la presencia de fases de CH y C-S-H. Por ejemplo, Taylor³¹ establece que si la relación C/S es menor de 1.5 tendremos C-S-H tipo uno y si es mayor a 1.5 se trata de C-S-H tipo 2, a su vez Rayment indica que se obtiene una fase C-S-H si la relación C/S se encuentra entre 1.75 a 1.85, por su parte Metha, refiere que el intervalo de la relación C/S varía entre 1.5 y 2. Por lo tanto el efecto de las partículas submicrométricas de minerales de fósforo (PMF), favorece la formación de fases hidratadas que se dispersan de manera uniforme sobre la superficie de los agregados pétreos y en la zona de transición, favoreciendo con esto un acoplamiento más robusto entre los agregados y el material cementante, lo que a su vez, genera un mejor desempeño mecánico del mortero.

En resumen, los resultados y análisis realizados mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, así como las pruebas de resistencia a la compresión, parecen indicar que la adición de partículas submicrométricas de minerales de fósforo (PMF) en las mezclas de mortero favorece una distribución más homogénea de la fase pasta de cemento sobre la estructura del material. Esto, si suponemos que las partículas submicrométricas funcionan como un activador para promover el proceso de hidratación, principalmente de la fase del gel C-S-H, responsable de la consolidación y resistencia mecánica de la mezcla.

3 Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*. 2da Edición. London: Thomas Telford.

Figura 12.
Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la zona de la cavidad.



Conclusiones

Al término del presente trabajo de investigación y bajo los sustentos experimentales y bibliográficos se obtienen las siguientes conclusiones finales:

La adición de partículas submicrométricas de fosfato tricálcico (TCP) de origen natural en proporciones del 1% en peso respecto del cemento Portland ordinario, en mezclas de mortero elaboradas con agua potable de la red, así como un curado en condiciones de clima y humedad ambiente, incrementa su resistencia mecánica en compresión hasta en un 20% con respecto a la mezcla de mortero sin aditivos.

El análisis mediante microscopia óptica y electrónica de barrido de la microestructura de las mezclas de mortero preparadas con partículas submicrométricas de TCP, indica que se obtiene una distribución más homogénea de la fase aglomerante (cemento) en las mezclas de mortero.

Los resultados experimentales anteriores indican que es muy probable que el aditivo genere el relleno de micro y nano porosidades dentro de su estructura, por medio de la “siembra de nano partículas cerámicas activas” provenientes del aditivo generado mediante partículas submicrométricas de fosfato tricálcico (TCP) de origen natural, interactuando de una forma química como catalizador en las fases de hidratación del cemento, lo que incrementa su resistencia a la compresión.

El empleo de biocerámicos naturales como lo es el caso del fosfato tricálcico (TCP) de origen natural, hace económicamente competitivo el procedimiento para obtener mezclas de mortero con mayor resistencia mecánica a la compresión. Sin embargo, se necesita experimentar con un método para la obtención del aditivo más económico.

El empleo de biocerámicos naturales como el fosfato tricálcico (TCP) de origen natural, hace ecológicamente viable el uso de este material debido a la disminución de dióxido de carbono y al ciclo de vida de los materiales, ya que, al ser un elemento biocompatible, causa menor daño al medioambiente comparado con los aditivos químicos tradicionales utilizados para incrementar la resistencia a la compresión.

Los estudios realizados a la edad de 3, 7, 14 y 28 días para conocer sus características físicas y químicas, así como el desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión en función del tiempo en que las mezclas de mortero alcanzan su máxima resistencia, establecen que a la edad de 14 días existe una resistencia máxima a la compresión.

Referencias

- Abmed, A.H.M. *et al.* (2014). "Cell Attachment Properties of Portland Cement-based Endodontic Materials: Biological and Methodological Considerations". *Journal of endodontics*. 40 (10). pp:1517-1523.
- Arboláez, I. A. y Griffin M. S. (2005). "Evaluación de la hoja del maíz como posible fuente de material puzolánico". *Tecnología y construcción*. 21 (3), pp: 09-18.
- ASTM C 109/C 109M. (2007). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- Cadena E. G. (2014). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánicos para incrementar su resistencia ante ataques de sulfatos*. Tesis. Maestría en Ciencias de la Construcción. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
- Chanu, N. M. y Devi, Th. K. (2013). "Contribution Of Rice Husk Ash To The Properties Of Cement Mortar And Concrete". *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2 (2), pp: 1-7.
- Gandolfi, G.M. *et al.* (2008). "New Portland Cement-based Materials for Endodontics Mixed with Articaine Solution: A Study of Cellular Response". *Journal of Endodontists*. 34 (1), pp: 39-44.
- Hernández J. U. (2011). *Comportamiento mecánico y físico del mortero a base de CBCA como árido en aplanados en muros*. Tesis. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería. Región Xalapa.
- Kanning *et al.* (2014). *Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement*. *Construction and Building Materials*. 54, pp: 460-465.
- Lin, K. L. *et al.* (2009). Influence of phosphate of the waste sludge on the hydration characteristics of eco-cement. *Journal of Hazardous Materials*. 168, pp: 1105-1110.
- Liu, H. *et al.* (2003). *Microstructure of cement mortar with nanoparticles*. *Composites: Part B*. 35. pp: 185-189.
- Mahmoud, H. *et al.* (2012). Groundnut shell ash as a partial replacement of cement in sandcrete blocks production. *International Journal of Development and Sustainability*. 1 (3), pp: 1026-1032.
- Martínez R. J. (2007). *Caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, industrial y desperdicio agrícola*. Tesis. Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales), Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR, Unidad Oaxaca.
- Mehta, P. K. (2006). *Microstructure, Properties and Materials*. 3ra Edición. McGraw-Hill.
- Piyanut, M. *et al.* (2012) "Effects of Fine Bagasse Ash on the Workability and Compressive Strength of Mortars". *Chiang Mai Journal of Science*, 40(1). pp: 126-134.

- Tay, R.F. *et al.* (2007). "Calcium Phosphate Phase Transformation Produced by the Interaction of the Portland Cement Component of White Mineral Trioxide Aggregate with a Phosphate-containing Fluid". *American Association of Endodontists*. 33 (11), pp: 1347-1351.
- Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*. 2da Edición. London: Thomas Telford.
- Vélez, M.A. (2016). *Endurecimiento de Cementos tipo Portland por medio de Fosfatos y/o Silicatos*. Tesis Doctoral. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de conocimiento en Tecnología.
- Vélez, M.A. (2010). *Concreto Nanotecnológico; Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con partículas Submicrométricas*. Tesis de Maestría. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de conocimiento en Tecnología.

SECCIÓN III: MATERIALES TRADICIONALES EN LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE

Metodología para la evaluación de bambúes nativos de menor diámetro en México, para su aprovechamiento estructural.

Caso de estudio *Otatea fimbriata*

Hector Daniel Llaven José*
Cesar Armando Guillén Guillén**
Alberto Muciño Vélez***

Introducción

El uso de materiales convencionales en la industria de la construcción ha ocasionado daños irreparables al medio ambiente y a la salud de los seres humanos, siendo considerada, además, como una de las más contaminantes del planeta. En México y el mundo, pese a sus repercusiones, continúa creciendo el uso masivo de materiales convencionales, arraigándose cada vez más a los procesos de autoconstrucción y desplazando a los materiales regionales.

Es por ello, que se vuelve relevante la generación de información tecnológica de materiales alternativos de índole natural, para uso y aprovechamiento en la configuración de construcciones de bajo impacto ecológico. Dentro de la gama de materiales producto de la naturaleza se encuentran los bambúes: pastos leñosos que pertenecen a la familia

* Universidad Nacional Autónoma de México. hector.llaven@comunidad.unam.mx

** Universidad Nacional Autónoma de México. cguillen@unam.mx

*** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

botánica de las gramíneas (*poaceae*); poseen una definida sección circular e interior generalmente hueco (Da Silva, 2018), distribuida ampliamente en el mundo con más de 1700 especies, encontrándose desde el nivel del mar hasta los 3400 m.s.n.m.

Debido a sus características botánicas e impactos significativos en el medio ambiente, los bambúes se identifican como las plantas del milenio y un fiel aliado contra la lucha contra el cambio climático al minimizar los impactos generados por los materiales convencionales (INBAR, 2014; Torres *et al.*, 2019). Su aprovechamiento viene a ser muy variado incidiendo en diferentes sectores industriales como el de la agricultura, la construcción, la alimentación, fabricación de papel, biomasa, carbón, artesanías, herramientas musicales, etcétera (García *et al.*, 2015) (Llaven-José & Castañeda-Nolasco, 2023).

La especie de bambú *Otatea fimbriata*, forma parte de las 64 especies nativas reportadas para la república mexicana (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2024), estando estrechamente relacionada a la cultura de la región donde nace de forma natural, siendo utilizada en la composición de herramientas de uso doméstico y agrícola, además de formar parte integral de la tradicional vivienda de la región (Llaven-José & Castañeda-Nolasco, 2023).

A pesar de su importancia y amplia distribución, es evidente una falta de información tecnológica de las especies dentro de la república mexicana, el desconocimiento de las propiedades físicas y mecánicas, sus formas de aprovechamiento y sus aplicaciones constructivas en la configuración de elementos estructurales, que conllevan a un uso deficiente y pragmático, no normalizado. Por ello se propicia la utilización de especies de bambú introducidas, que por su renombre mundial, información y normatividad aplicable se vuelven una opción alternativa, desplazando por ello a las nativas.

Esto se hace evidente en la literatura, donde se carecen estudios para el diseño estructural aplicando especies de menor diámetro como la *Otatea fimbriata*. Además, a nivel mundial se tienen referencias de especies pequeñas de menor diámetro como *Phyllostachys aurea*, *Chusquea coliu*, *Thyrsostachys siamensis*, *Thyrsostachys oliveri*, que son empleadas en la conformación de estructuras ligeras, así como de gran envergadura con claros que van desde los 4 a 15 metros (Peña, 2015; Poblete *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2022).

Un contraste efectivo es la información encontrada para especies comerciales como *guadua angustifolia* y *bambusa oldhamii*, siendo que para la primera se tiene un estricto marco normativo que va desde su silvicultura hasta su aprovechamiento constructivo (ICONTEC, 2018b, 2020; ICONTEC, 2021). Y en México, ambas especies aparecen en la norma, además de *Guadua aculeata*, que es nativa mexicana (SMIE, 2021).

Con el objetivo de generar información tecnológica de especies de bambú de menor diámetro se plantea una metodología para el empleo estructural en la conformación de viviendas sustentables de sistema abierto. Donde *Otatea fimbriata*, al igual que otras especies de bambú, presenta comportamientos mecánicos en correcta relación a sus características anatómicas y sus formas de crecimiento. Es de resaltar que la generación de datos sobre la especie propicia su utilización en la industria de la construcción, como una alternativa eficiente, ecológica y económicamente adaptable.

Objetivo

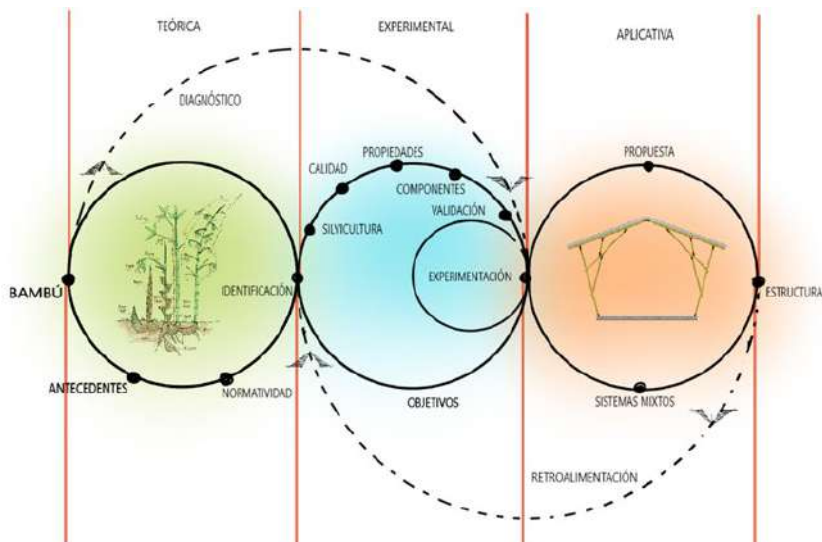
Desarrollar una propuesta metodológica para el estudio y aprovechamiento estructural de materiales de índole natural, específicamente para bambúes de menor diámetro en México.

Metodología

Para el estudio de materiales alternativos de índole natural, se propone una metodología agrupada en tres fases: Teórica, experimental y aplicada (Figura 1). Dicha metodología, enfocada a especies nativas de bambúes de menor diámetro, nos lleva a su reconocimiento por medio de la identificación de sus propiedades, la evaluación de sus características constructivas y la posterior aplicación estructural.

Figura 1.

Proceso metodológico para el estudio de especies nativas de menor diámetro en México. Fuente: Elaboración propia.



Fase Teórica

En esta fase de procura obtener información de referencia inherente a los materiales naturales encontrados en la zona, en este caso los bambúes, se presentan preguntas cómo ¿que son?, ¿cuáles son sus características?, ¿cuáles son sus formas de aprovechamiento? Además, mediante una investigación bibliográfica se busca información sobre las especies de menor diámetro presentes en México y el mundo, sus aplicaciones constructivas y la normatividad que las rigen, siendo además que, al estar circunscrita en un lugar con características propias, es necesaria la información referente al contexto donde se realiza el estudio

Estado del arte

Mediante una investigación bibliográfica se recaba información sobre investigaciones que hayan estudiado bambúes de menor diámetro, desde su caracterización física y mecánica hasta su aplicación constructiva. Se hace énfasis en géneros de bambú como: *Otatea*, *Thirsostachys*, *Phyllos-*

tachys y *Chusquea*, que presentan ciertas similitudes morfológicas en cuanto a diámetros.

Antecedentes

Información sobre las aplicaciones constructivas de los materiales estudiados, construida a partir de las características constructivas de las especies nativas identificadas. Donde se definen formas constructivas, materiales, uniones y formas estructurales.

Normatividad

Mediante una búsqueda bibliográfica en fuentes confiables se obtienen aquellas normas, leyes o códigos a nivel internacional y nacional que regulan el aprovechamiento en todas las fases de la cadena de valor de los bambúes.

Diagnóstico

Cómo los materiales naturales se encuentran en condiciones geográficas en específico, y en constante interacción con sectores sociales y ambientales, es necesario su estudio y la determinación de las condiciones geográficas, ambientales y sociales inherentes a la zona, con cuya información se plantean soluciones constructivas afines a los materiales locales identificados.

Análisis contextual

Se destaca la información del sitio de estudio, localización, tipo de vegetación, topografía, materiales naturales disponibles y tipologías constructivas, todo ello permite la identificación de problemáticas y posibles soluciones constructivas.

Objetivos

Se plantean los objetivos generales y particulares para el establecimiento de la propuesta, mismas que están relacionadas a los avances investigativos desde la recolección de información, evaluaciones, hasta la construcción de modelos experimentales.

Fase Experimental

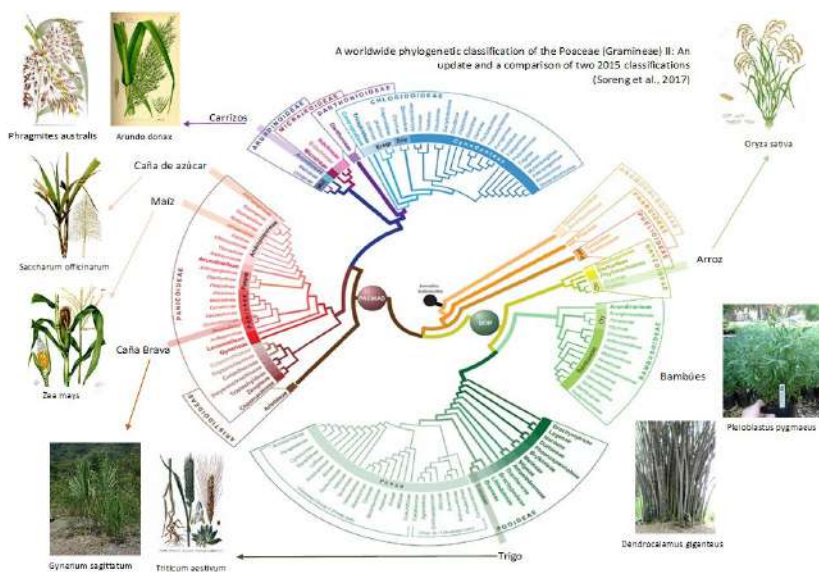
Fase integrada por una serie de pasos donde se adentra a la obtención de información del bambú local, teniendo plena certeza de su identificación, aspectos importantes en el control de calidad para alargar su vida útil, análisis y evaluación del material. La experimentación va dirigida a plantear soluciones constructivas confiables y eficientes, adaptadas a las condiciones sociales y económicas de la zona de estudio.

Identificación

Los bambúes al ser muy diversos en México y el mundo, presentan características únicas e irrepetibles que les hacen distinguirse entre la familia botánica de las gramíneas al cual pertenecen (Figura 2). Por lo que la fase de identificación es indispensable y parte fundamental para el trabajo con este material natural, ya que permite tener la precisión de la especie que se está trabajando.

Figura 2.

Familia botánica de las gramíneas y la localización de los bambúes.



Fuente: Elaboración propia.

Para este proceso, se precisan dos rutas para la noción de identificación de los bambúes:

- **Colectas Botánicas**

Ximena Londoño (2010), para determinar una buena recolección, plantea una serie de prioridades para tener en cuenta, mismas que van desde la identificación del equipo necesario, herramientas de cortes, precisión de las partes del bambú a coleccionar (culmo, hojas caulinares, ramas, follaje, rizoma e inflorescencia).

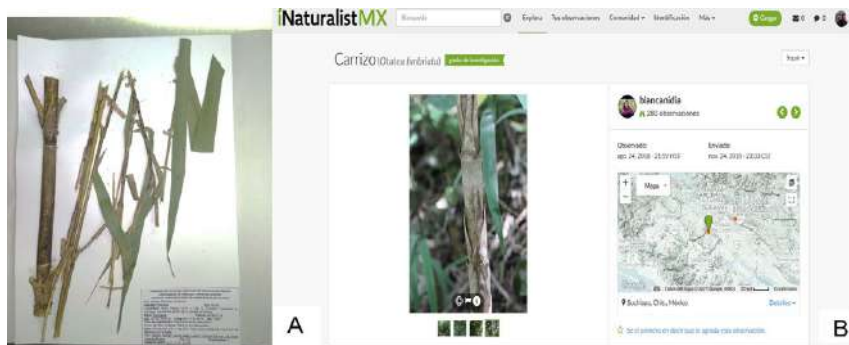
Estas colectas se ingresan a herbarios con su debida descripción de la especie en su etiqueta y número de colecta (Figura 3 A).

- **Identificación digital**

Al usar herramientas digitales de identificación de especies vegetales, se plantea la utilización de la página web y Apps desarrolladas de iNaturalista México (*iNaturalist Mexico*, 2025). Mediante la cual se llegan a identificar especies, con el empleo de fotos detalladas y donde expertos taxónomos emiten su opinión para su precisa identificación (Figura 3 B). Para ello se agregan fotos del tallo, hojas, rizoma, además de capturar la información de la zona donde se toman las fotografías y datos geográficos respectivos.

Figura 3.

Identificación de bambúes. A Colecta e Identificación botánica de *Oatea fimbriata* en Suchiapa, Chiapas. B Identificación por medios digitales en la página de iNaturalist.



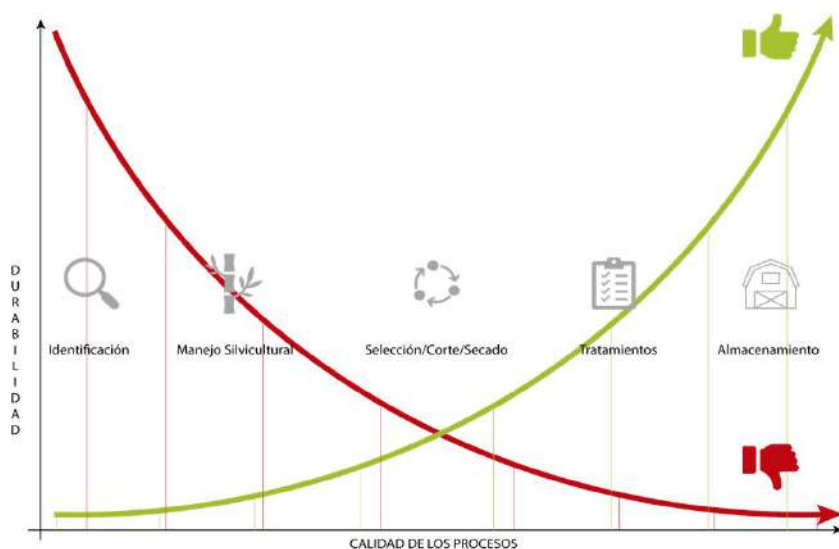
Fuente: Elaboración propia a partir de iNaturalis México.

Control de calidad

Los procesos de control de calidad son indispensables, inherentes a materiales naturales fibroleñosos, estrechamente correlacionados a su durabilidad y resistencia. Es por lo que se deben desarrollar siguiendo las normativas correspondientes al material seleccionado. Estos procesos tienen como punto de partida la identificación del material (abordado en la sección anterior), siguiendo por los procesos de manejo silvicultural, selección, corte, secado y almacenamiento del material (ver Figura 4).

Figura 4.

Procesos inherentes a la correlación de los de los controles de calidad y la durabilidad de los materiales naturales fibroleñosos.



Fuente: Elaboración propia.

Manejo silvicultural

Al trabajar con materiales naturales, es indispensable planes de manejo donde se salvaguarde la salud de las plantaciones o bien esfuerzos encaminados en mejorar las condiciones físicas de poblaciones silvestres.

Atendiendo, además, métodos de propagación adecuados para las especies seleccionadas, los cuáles pueden ser sexuales o asexuales.

Para el caso de los bambúes se deben seguir protocolos como los planteados en las normas técnicas colombianas para *Guadua angustifolia*, explorando en cada caso la adaptación de los procesos a las especies nativas encontradas en cada zona.

- NTC 5405:2016 Propagación vegetativa de *Guadua angustifolia* kunth.
- NTC 5726:2009 Inventario de rodales de *Guadua angustifolia* kunth para aprovechamientos con fines comerciales.

Selección - Corte

Proceso mediante el cual se escogen las cañas maduras para su utilización en la construcción, para ello se siguen los parámetros planteados en la NTC 5300:2020 relacionados con la cosecha de culmos de *Guadua angustifolia* kunth (ICONTEC, 2020) y se toma en cuenta lo siguiente:

- Limpieza. Corte de ramas y malezas que dificultan el proceso de extracción de culmos.
- Selección y marcación. Proceso de identificación de tallos maduros (3-4 años), donde se adquiere la resistencia óptima, producto del proceso de lignificación. En esta etapa es indispensable el control de los procesos de crecimiento de las especies. Además, se reconocen conocimientos tradicionales, donde a través de aspectos físicos se seleccionan las cañas maduras.
- Los culmos seleccionados deben de cumplir con buen estado fitosanitario (sin daños por hongos e insectos) y buen estado físico (sin defectos como rajaduras o perforaciones) (Figura 5).
- El corte se realiza arriba del primer o segundo nudo (evitando la acumulación de agua). En la fase lunar de luna nueva o cuarto menguante, cuando los efectos de la luna sobre las plantas son mayores.
- Después de la cosecha de los culmos, estos se deben de manipular con tal de evitar su deterioro por golpes.

Figura 5.

Imperfectos encontrados en culmos de *Otatea fimbriata*. A y B perforación en entrenudo, C presencia de residuos de aserrín al interior de culmo, D coloración amarilla opaca e imperfectos en pared del culmo encontradas en cañas sobremaduras.



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento de preservación

Proceso mediante el cual se tratan los culmos para protegerlos ante el ataque de insectos xilófagos y hongos, y así alargar su vida útil, para ello se toma como guía la NTC 5301:2018 Preservación y secado del culmo de *guadua angustifolia kunth* (ICONTEC, 2018a). Donde se destacan dos procesos de preservación:

1. Sin presión: Procesos que permiten aplicar el preservante sin ayuda de fuerza mecánica.
 - Tratamientos naturales. Avinagrado, inmersión en agua corriente, aplicación de fuego, ahumado.
 - Inmersión en soluciones de sales de bórax y ácido bórico al 4 o 6%.
2. Con presión: Procesos que permiten aplicar el preservante con ayuda de fuerza mecánica.
 - Boucherie modificado (desplazamiento de savia).

Es de destacar que estos tratamientos están en función de las características morfológicas de las especies a tratar y de sus propósitos comerciales.

Al ingresar el material a cualquier forma de tratamiento, se tienen que cumplir condiciones de limpieza, retirando cualquier tipo de impureza adherida a la pared del culmo.

Además, para denotar la impregnación de las varas por la solución de bórax y ácido bórico, es indispensable la evaluación de su efectividad, mediante la utilización de sustancias reveladoras, que, mediante la reacción en cambios de color, se evidencia la presencia de la solución al interior de los culmos.

Secado

Proceso mediante el cual las varas de bambú alcanzan su condición seca (12–14%) y se adaptan a las condiciones medioambientales de las zonas de aprovechamiento. Éstas pueden ser naturales o al aire libre, artificiales, mixtos o semiartificiales (ICONTEC, 2018a).

Almacenamiento

Proceso mediante el cual se mantienen los culmos alejados de la humedad que puedan adquirir del suelo, por ello, se mantienen en sitios aireados y protegidos de la radiación solar (ICONTEC, 2020).

Esto se logra mediante estructuras que propician el almacenamiento horizontal de los culmos y que, además, permiten la clasificación de los diámetros según su aplicación o fin deseado.

Propiedades físicas y mecánicas

Evaluaciones destinadas a establecer los valores y resistencias de los bambúes, los cuales conforman el establecimiento de información tecnológica de las especies para ser utilizadas en diseño estructural, para ello se toma de referencia la Norma ISO 22157–NTC 5525, que nos demanda la obtención de las siguientes propiedades:

- Propiedades físicas
 - Contenido de humedad
 - Densidad
- Propiedades Mecánicas
 - Compresión paralela a la fibra
 - Tensión paralela a la fibra
 - Flexión paralela a la fibra
 - Corte paralela a la fibra
 - Tensión perpendicular a la fibra
 - Flexión perpendicular a la fibra

En estas evaluaciones es indispensable la instrumentación propuesta en la norma para la obtención de datos característicos de la especie analizada.

Evaluación componentes estructurales

Visualizando el fin último de los bambúes nativos en la composición de estructuras, es indispensable su visualización en la configuración de componentes muro (columnas) o Cubierta (vigas). Para ello se tomará como referencia la norma NTC 5407: Uniones de Estructuras con Guadua angustifolia Kunth (ICONTEC, 2018b) y la Norma ISO 22156: 2021 Bamboo structures — Bamboo culms — Structural design (ISO, 2021).

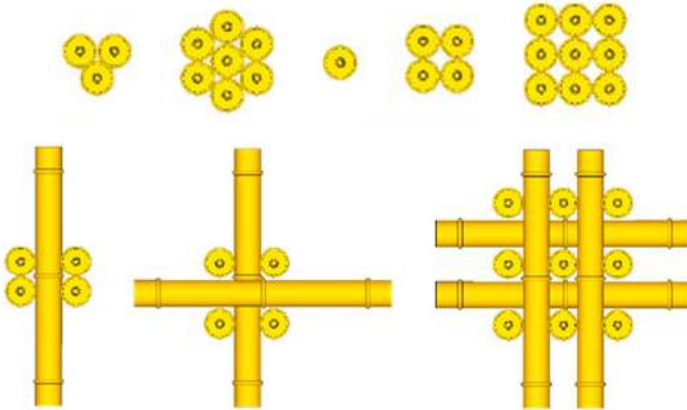
Mismas que dan referencias a la configuración de uniones y dotan de parámetros para la evaluación de nuevas configuraciones, según el fin deseado; todo ello tomando como referencia las características de la especie de bambú encontrada en la zona.

- Uniones
 - Elementos esenciales e importantes en la construcción con bambú para la transmisión de las fuerzas entre los elementos y donde, debido a la variedad de secciones propias de cada especie, existen diversidad

de tipologías que van desde las tradicionales hasta los que emplean tecnología de punta (Figura 6) (Larrinaga *et al.*, 2018).

Figura 6.

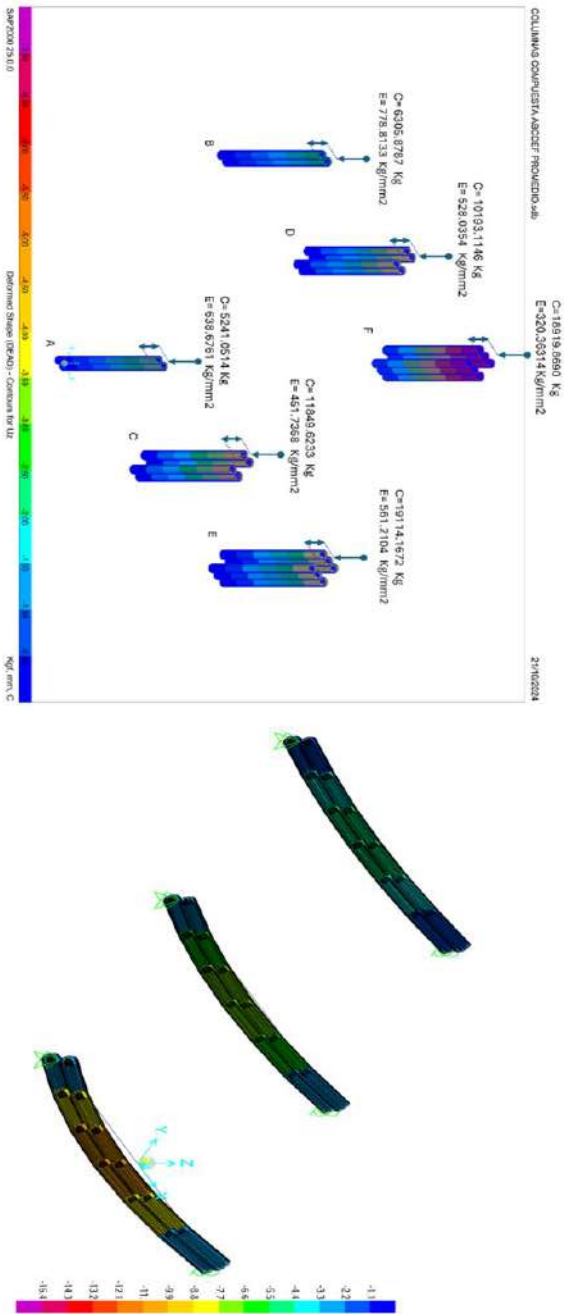
Diferentes configuraciones de uniones empleando
Oatea fimbriata. Fuente: Elaboración propia.



Validación

Proceso de validación de datos obtenidos en las evaluaciones anteriores, que dotan de confiabilidad, seguridad y eficiencia a las propuestas estructurales resultantes, es por lo que los datos resultantes de componentes estructurales ensayadas en laboratorio e información característica de la especie en particular (propiedades físicas y mecánicas) se vacían y corroboran en estudios mediante el empleo de software especializado de análisis estructural (Figura 7).

Figura 7.
Validación de datos de componentes estructurales de columna
y vigas, mediante el uso de software especializado de análisis estructural.



Fuente: Elaboración propia.

Propuesta y evaluación

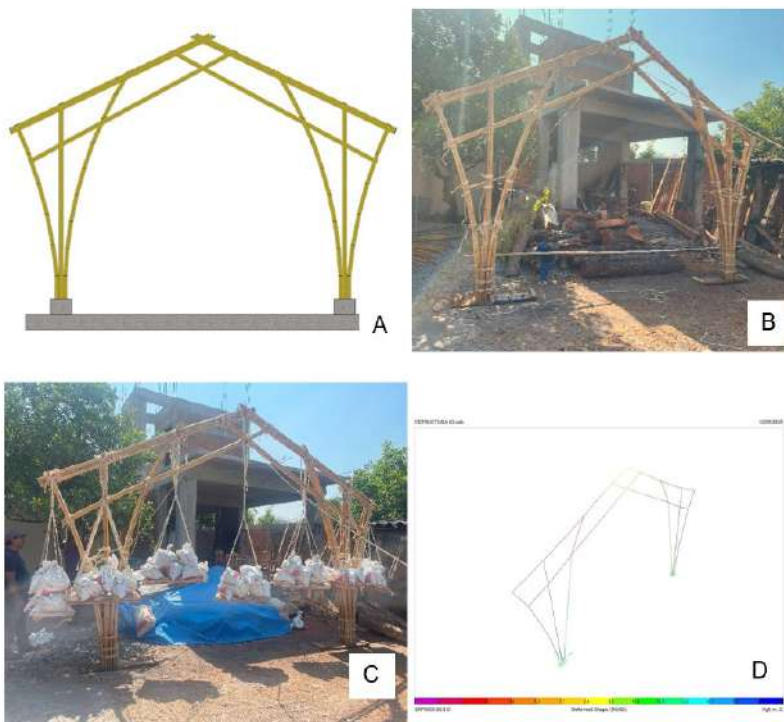
A partir de los datos representativos de las evaluaciones anteriores, características morfológicas de la especie, problemáticas locales, disposición de materiales locales y su interrelación, surgen alternativas de solución estructural. Alternativas que se evalúan y analizan para determinar sus comportamientos en conjunto, todo ello en correspondencia a normatividades entorno al diseño de estructuras. Para ello se realizan los siguientes pasos de evaluación de alternativas:

- **Propuesta de estructura:** Alternativa de solución que surge a partir del análisis de las problemáticas de la zona, que repercuten en la configuración de un sistema mixto prefabricado y eficiencia de materiales.
- **Construcción de modelo a escala 1:1:** Configuración mediante la cual se llevan a la realidad la configuración e interrelación entre los elementos.
- **Evaluación de modelo a escala 1:1:** Proceso mediante el cual se evalúan los comportamientos y desplazamientos de la composición estructural ante la presencia de una carga.
- **Análisis de modelo en software especializado:** Proceso mediante el cual se evalúa la estructura con datos validados y obtenidos en etapas anteriores en software especializado en diseño estructural.

Figura 8.

Proceso de evaluación de estructura a base de Otatea fimbriata.

A diseño de estructura en 2D; B construcción del modelo en escala 1:1; C evaluación de estructura a escala 1:1; D análisis de comportamiento de estructura en software especializado.



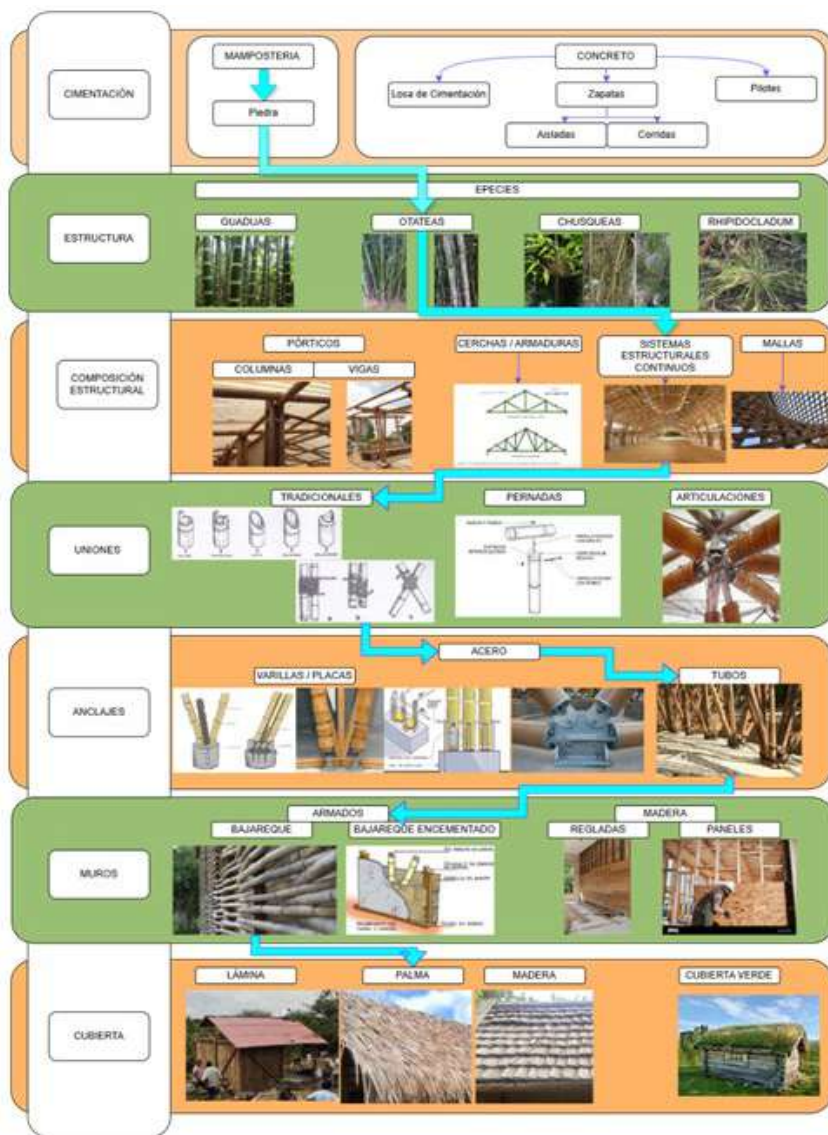
Fuente: Elaboración propia.

Fase de aplicación

Fase donde converge todo el conocimiento en torno a los bambúes, sus características, forma de aprovechamiento y regulaciones. Además de las necesidades intrínsecas de los usuarios, se propone una configuración estructural ligera de fácil construcción y montaje. Para ello convergen todas las fases antes estudiadas para la generación de un proceso, el cual debe ser validado mediante el diseño estructural (Figura 9).

Figura 9.

Proceso de configuración de propuesta con base a las problemáticas y a materiales naturales locales.



Fuente: Elaboración propia.

Cimentación: Base de fundición de la estructura que se propone en función de los materiales disponibles en la zona.

Estructura: Composición de elementos estructurales en correspondencia a la especie de bambú analizada, creando sistemas constructivos abiertos, cerrados o mixtos.

Uniones: Dentro de la diversidad de uniones aplicables a los bambúes, se escogen aquellos de baja tecnología que, por su facilidad constructiva, llegan a ser una opción factible, con sus debidas recomendaciones de aplicación.

Anclajes: Elementos de sujeción que van de la estructura a la base y están en correspondencia con la configuración estructural elegida.

Muros Configuración de muros a partir de crear espacios cerrados, para ello se hace uso de entramados y sistemas constructivos con tierra, para la creación del sistema mixto final.

Cubierta Configuración de cubierta ligera, a base de materiales naturales e industrializados encontrados en la zona, que por su ligereza y durabilidad surgen como alternativas.

Conclusiones

Los materiales alternativos de índole natural se muestran cómo una alternativa fiable para la composición estructural de espacios habitables, y donde plantas como el bambú, sobresalen al ser un material local, de rápido crecimiento, con múltiples cualidades medioambientales, y capacidades estructurales propias a las de un material de alta tecnología.

Este trabajo contribuye a la generación de bases técnicas para el estudio y aplicación de materiales naturales, el análisis de bambúes nativos en México, exponiendo sus características y ventajas constructivas.

En esa índole, la propuesta metodológica aquí planteada expone los pasos esenciales para el trabajo, no solo con bambúes nativos, si no a la vez, de otros materiales fibroleñosos encontrados en la república mexicana y en especial aquellas con diámetros inferiores a 5 cm. Tal como la especie *Oatea Fimbriata*, que se precisa su utilización no solo de forma secundaria si no como elemento estructural para la configuración de espacios habitables.

Dentro del proceso, se resalta la importancia de la identificación de las especies a trabajar, reconociéndose sus características intrínsecas, control en los procesos que repercuten en su calidad y vida útil, además del diseño, evaluación y validación de sus composiciones estructurales.

Referencias

- Da Silva, F. J. (2018). “Análisis estructural de tres columnas de Bambú y sus aplicaciones sostenibles en Arquitectura”. *Procesos Urbanos*, 5, 79–90. <https://doi.org/10.21892/2422085x.413>
- García, E., Silva, E., Reyes, J., Arcocha, E., Buenfil, C., Bolívar, N., & Cortés, G. (2015). “Caracterización físico-mecánica del recurso natural Bambú presente en el Estado de Campeche, México”. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2, 14.
- ICONTEC. (2018). NTC 5407: *Uniones de Estructuras con Guadua angustifolia Kunth* (I. C. de N. T. y C. (ICONTEC), Ed.).
- ICONTEC. (2021). NTC 5525: *Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú. Métodos de ensayo* (NTC 5525). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- iNaturalist Mexico. (2025). <https://mexico.inaturalist.org/home>
- INBAR. (2014). “El bambú: un recurso estratégico para que los países reduzcan los efectos del cambio climático”. In *Red Internacional del Bambú y el Ratán* (Vol. 1). <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- ICONTEC. (2018). NTC 5301:2018 *Preservación y secado del culmo de guadua angustifolia kunth*. <https://tienda.icontec.org/gp-preservacion-y-secado-del-culmo-de-guadua-angustifolia-kunth-ntc5301-2018.html>
- ICONTEC. (2020). NTC 5300:2020 *Cosecha y postcosecha de culmos de guadua angustifolia kunth*. <https://tienda.icontec.org/gp-cosecha-y-postcosecha-de-culmos-de-guadua-angustifolia-kunth-ntc5300-2020.html>
- ISO. (2021). ISO 22156: 2021 *Bamboo structures — Bamboo culms — Structural design* (2da ed.). <https://www.iso.org/standard/73831.html>
- Larrinaga, R. A., Avellaneda Díaz-Grande, J., & Lecumberri, J. M. (2018). *Jornada de doctorado del programa TAEU*. 25–27. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/3853>
- Llaven-José, H. D., & Castañeda-Nolasco, G. (2023). “Tecnología constructiva del Bambú Nativo. *Otatea Fimbriata* Soderstr., en el Estado de Chiapas, México”. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6076>
- Peña, C. M. (2015). *Solución Bambú: Guía para el manejo sustentable del género Phyllostachys* (Tigre, Ed.; 1a. edición especial).

- Poblete, H., Cuevas, H., & Diaz-Vaz, J. E. (2009). "Property characterization of Chusquea culeou, a bamboo growing in Chile". *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 11(2), 129–138. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2009000200004>
- Ruiz-Sanchez, E., Anaya-Corona, M. D. C., & Londoño, X. (2024). "Guadua guzmanii (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduiniae): A new woody bamboo species endemic to Jalisco, Mexico". *Advances in Bamboo Science*, 7, 100084. <https://doi.org/10.1016/J.BAMBOO.2024.100084>
- SMIE. (2021). NTC: Norma Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. In Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.
- Torres, B., Segarra, M., & Bragança, L. (2019). "El bambú como alternativa de construcción sostenible". *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 389. <https://doi.org/10.30972/eitt.503787>
- Ximena Londoño, P. (2010). *Identificación taxonómica de los bambúes de la Región Noroccidental del Perú*.
- Zhang, Z., Rao, F., & Wang, Y. (2022). Morphological, Chemical, and Physical–Mechanical Properties of a Clumping Bamboo (*Thyrsostachys oliveri*) for Construction Applications. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 3681, 14(17), 3681. <https://doi.org/10.3390/POLYM14173681>

El entrepiso de pajarcilla en la construcción contemporánea. Prefabricación, evaluación y aplicación ante la falta de normativas

Alan Sosa Contreras*
Luis Fernando Guerrero Vaca**
Alberto Muciño Vélez***

El material (la pajarcilla)

La pajarcilla es una técnica similar al bajareque, con la diferencia de que se requiere apisonar dentro de una cimbra temporal. Para su elaboración, la paja se esparce en una lona y se va humedeciendo con la barbotina (tierra en estado semilíquido). Ambos materiales deben combinarse hasta obtener una mezcla lo suficientemente seca para ser compactada, pero con la cantidad de barbotina necesaria para aglutinar la paja (Caballero Cervantes & Guerrero Baca, 2021b).

* Universidad Nacional Autónoma de México. alansosac15@gmail.com

** Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. luisfgr1960@yahoo.com.es

*** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

Figura 1.

Proceso de elaboración de la pajarcilla.



Fuente: Elaboración propia

La tierra aligerada, bajo una definición establecida en el Lehmbauordnung de 1944 (Volhard, 2016a), es una masa de tierra mezclada con algún agregado aligerante, con lo que se obtienen densidades menores a 1200kg/m³. Como la técnica constructiva ha sido adaptada a los recursos de cada entorno, han aparecido variantes cuyo nombre responde al agregado aligerante de la mezcla, por lo que también se conoce como “fibra-arcilla” o “paja-arcilla” (Volhard, 2016a).

Figura 2:

Diferentes densidades en la pajarcilla.



Fuente: Vohard, 2016a

Como su nombre lo indica, la ligereza es su principal característica, por lo que se llega a subdividir de acuerdo con su densidad en: ligera, media

y pesada. La más densa se encuentra entre los $800\text{-}1200\text{kg/m}^3$ (pesada), mientras que el grado medio va de los $600\text{-}800\text{kg/m}^3$ (media) hasta la más ligera, que ronda entre los $600\text{-}300\text{kg/m}^3$ (ligera) (Volhard, 2016a). Gernot Minke menciona que en densidades menores a 600kg/m^3 , la tierra no tiene la capacidad de proteger a la fibra de insectos, humedad o despedimiento (Minke, 2006) y tampoco se recomienda utilizar densidades de $600\text{-}800\text{kg/m}^3$ para entepisos que estarán sometidos a esfuerzos o carga viva. Por su parte, se dice que las mezclas pesadas o densas, tienen buena estabilidad para usarse en entepisos e incluso para hacer bloques o elementos prefabricados (Volhard, 2016d).

Por estar dentro de los entramados, la pajarcilla requiere una estructura principal de madera o algún otro material. Para el caso del entepiso, se usan viguetas de madera, que deberán cumplir con los requerimientos tanto estructurales como de seguridad contra el fuego. Sobre ellas se colocan los refuerzos transversales simplemente apoyados en la parte superior de las viguetas o bien, sobre rieles clavados a los costados. Una tercera opción, que mezcla las ventajas del apoyo simple sin aumentar el peralte del entepiso, se logra insertando los refuerzos en pequeñas ranuras a lo largo de las viguetas ((Volhard, 2016b).

Figura 3.

Estructura de madera en el entepiso de pajarcilla.



Fuente: Elaboración propia

Se utiliza tanto para muros de relleno como en entepisos, para el caso de querer utilizarse en entepisos o cubiertas se debe tomar en cuenta que la compactación debe realizarse de forma horizontal entre las vigas

o morillos de la estructura principal, además de las especificaciones de la cimbra, de acuerdo con las características de cada proyecto. Esta cimbra consta de dos partes: la cimbra inferior, cuya longitud es del largo del claro y que se mantendrá fija durante la ejecución; y la cimbra superior, que sirve como tapa y que consta de tablas de 20 cm de ancho, las cuales se irán clavando y desclavando conforme se avanza en la fabricación (Caballero Cervantes & Guerrero Baca, 2021b).

Otra diferencia es el refuerzo interior, que es diferente al que se ocupa en los muros de pajarilla. Para los entrepisos, se tiene una estructura formada por rieles de madera de perfil cuadrado, los cuales van clavados a la mitad del peralte de las vigas. Estos rieles sirven de base para los refuerzos transversales, que son palos de escoba o varas, cortados a la medida entre vigas y colocados al interior cada 15 cm conforme se va compactando la mezcla (Caballero Cervantes, n.d.).

Figura 4.
Partes del entrepiso de pajarilla.



Fuente: Caballero Cervantes, s/f

Origen del problema

A partir de conocer el proceso constructivo y charlar con los maestros albañiles y arquitectos que habían usado este sistema (Caballero Cervantes *et al.*, 2022), se encontró que es una técnica que ha dado buenos resultados debido a su bajo costo económico y ambiental. Sin embargo, el proceso de fabricación puede resultar tedioso y cansado ya que los trabajadores deben permanecer en una posición encorvada mientras van comprimiendo la mezcla al interior de la cimbra. Aunado a lo anterior, solamente se utiliza la pajarcilla como relleno y aislante, sin brindarle una capacidad portante, por lo que los esfuerzos recaen únicamente en la estructura de madera (Caballero Cervantes & Guerrero Baca, 2021a).

Figura 5.

Proceso de elaboración tradicional del entepiso de pajarcilla.



Fuente: Elaboración

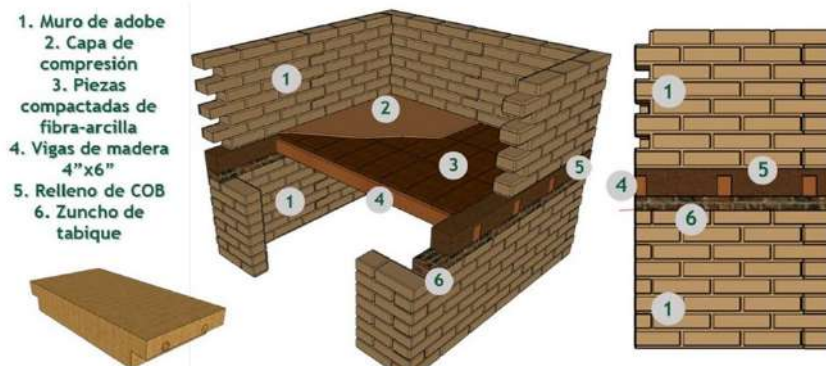
Con esto se establece que el esfuerzo que requiere su construcción no corresponde con las ventajas que brinda y que se le podría otorgar una respuesta mecánica a la pajarcilla para que trabaje en conjunto con la estructura principal. Es así como la investigación se centra en reducir el desgaste energético de los trabajadores y determinar el comportamiento mecánico de la pajarcilla.

Como respuesta inicial, se postuló la prefabricación de piezas tipo bovedillas de pajarcilla, que permitieran a los trabajadores realizar la mayor parte del proceso a nivel de suelo en una posición más cómoda. Esto también impactaría en los tiempos de construcción y reducción de material, ya que durante la etapa de secado de las piezas se pueden

llevar otras actividades como el levantamiento de los muros y colocación de las vigas de madera. Mientras que, una respuesta mecánica favorable con la pajarcilla permitiría omitir el enduelado superior de madera o, en su defecto, sustituirlo con una capa de compresión de esta pajarcilla.

Figura 6.

Primera propuesta de prefabricación del entrepiso.



Fuente: Elaboración propia

Información mecánica

Por tanto, se planteó la necesidad de obtener información sobre la resistencia del material para estar sometido a cargas externas. El análisis histórico mostró que, si bien existen muchas técnicas donde se utiliza la tierra en entrepisos, a este material únicamente se le confiere capacidad aislante, tanto térmica como acústica. Mientras que, por otro lado, la literatura menciona que los paneles o piezas de tierra no deben ser sometidos a cargas vivas y únicamente deben soportar su propio peso (Volhard, 2016c).

Aunque diversas investigaciones se han enfocado en el estudio de las técnicas de construcción con tierra, la mayoría se centra en pruebas de compresión aplicadas a otras técnicas distintas a la pajarcilla, como el adobe, bloques de tierra comprimida y bastidores de bajareque, con aplicación futura en muros. Y como cada investigación estudia la tierra de determinada región bajo características específicas, resultaría erróneo tomar los resultados de otros estudios como absolutos o válidos para la

propuesta. Por tanto, se requiere obtener dicha información a través de evaluaciones y pruebas como cualquier otro material constructivo.

Evaluaciones y normativas

No obstante, el uso de tierra como material de construcción se enfrenta a problemas de regulación en cuanto a su aplicación y métodos de prueba. En las normativas de construcción mexicana únicamente se menciona a la tierra para hacer referencia al material granulométrico dispuesto en el suelo donde se desplantará la construcción, y en ningún punto se menciona como material constructivo (Normas Técnicas Complementarias, 2017). De alrededor de 300 normativas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE) (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., 2023), únicamente 20 normas están enfocadas al análisis del suelo. Mientras que, para la tierra como material constructivo, solamente se cuenta con la NMX-C-508-ONNCCE-2014 que dicta los procesos de evaluación para los BTC's estabilizados con cal.

Al no contemplar a la tierra como material de construcción, no existen métodos de evaluación, ensayos específicos, parámetros o criterios a evaluar, lo que, por ende, le otorga un carácter restrictivo en su aplicación constructiva. Esto repercute indirectamente en malas prácticas, y merma el interés en innovaciones tecnológicas con tierra. Al no haber oportunidad de adaptar o modificar las técnicas de construcción con tierra a las necesidades de hábitat en la actualidad, se refuerza la percepción anacrónica de esta arquitectura y la idea de un material pobre (constructivamente) y para pobres.

Prefabricación para agilizar

La prefabricación en la construcción con tierra no es un tema nuevo. Tomando en cuenta que los primeros adobes se fabricaban a mano, al ser piezas que se ejecutan previo a su colocación final se puede tomar como un prefabricado. Hasta el año 700 a.e.c. aparece el adobe rectangular, una invención olmeca que tendía a la estandarización en la construcción. Esto propició avances más rápidos en las obras monumentales y la posibilidad

de su producción en masa facilitó programas de construcción mayores (Daneels Annick, 2020).

La prefabricación en arquitectura se había vinculado únicamente a materiales como el concreto, el acero, el aluminio o el plástico, en tiempos más recientes la construcción con tierra se ha tornado hacia el desarrollo de componentes prefabricados, ya que se postula que con esto se pueden mejorar las características naturales del material, así como garantizar las cualidades óptimas para su empleo y puesta en obra (Casares Ruiz & Gustamante Montoro, n.d.). Lo anterior está ligado a un aspecto económico, ya que, muchas veces, los materiales más conocidos (como el tabique, concreto o acero) se encarecen por los traslados que requieren para llegar a la mayoría de las regiones, por lo que la respuesta puede estar en los materiales que se tienen al alcance.

Figura 7.

Diferentes prefabricados de tierra aligerada.



Fuente: Davila Urrejola V, Contreras Silva J. 2022, Volhard, 2016c, Swallowbrick s/f.

Aunque en la actualidad se pueden encontrar diferentes productos prefabricados de tierra aligerada o pajarcilla, en la mayoría de los casos se ocupa de relleno y siempre se hace la recomendación de no utilizar estos elementos en espacios que estén sometidos a cargas vivas, aun cuando tengan algún refuerzo en su interior (Volhard, 2016c). Además de que, para que un prefabricado cumpla con una de sus ventajas, que es asegurar las cualidades óptimas en su colocación final derivado del control en el proceso de elaboración, será necesario conocer las propiedades mecánicas del material (Casares Ruiz & Gustamante Montoro, n.d.).

Procedimientos para prueba

Ante los problemas de regulación que existen con respecto a la tierra en cuanto a su aplicación y métodos de prueba, se optó por tomar como referencia algunos principios de evaluación utilizados en desarrollos tecnológicos similares, ya sean prefabricados de tierra o sistemas para cubiertas a base de materiales naturales. A partir de estos, se detectaron los esfuerzos a los que eran sometidas las propuestas tecnológicas. Algunos principios de diseño y evaluación fueron tomados a partir de casos análogos como el adobillo (Dávila Urrejola & Contreras Silva, 2022), el machimbloque (Sánchez Mora, 1983), los hourdiblocks (Auroville Earth Institute, n.d.), el sugarcrete (Gutierrez *et al.*, 2022) y el domotej (Castañeda Nolasco, 2022).

Figura 8:

Pruebas a desarrollos tecnológicos similares.



Fuente: Auroville Earth Institute, s/f, Castañeda Nolasco, 2022, Gutierrez *et al.* 2022

Consideraciones especiales

Cuando se utiliza la tierra para cubiertas, la literatura indica que suelen ser muy pesadas (aproximadamente $300\text{--}500\text{kg/cm}^2$) por lo cual, no se recomienda usar en zonas sísmicas. Aunado a lo anterior, y entendiendo que cada técnica resuelve sus dificultades o limitaciones técnicas a partir del diseño particular, no es lógico adoptar o adaptar las soluciones formales de los materiales industrializados para las técnicas de construcción con tierra (Casares Ruiz & Gustamante Montoro, n.d.). Por tanto, se retoman conceptos de resistencia por forma para resolver la prefabricación de la

pajarcilla en entrepiso. Entre ellos se encuentra el uso de formas curvas para repartición de cargas y promover la respuesta a compresión, por ser el esfuerzo al que mejor desempeño presenta la tierra.

Entrepisos: funcionamiento e influencia del peso

Ahora bien, los elementos horizontales como las cubiertas y los entrepisos pueden entenderse en términos estructurales como diafragmas. La función de estos es la transmisión de las cargas hacia los elementos verticales, de forma que ayude a la edificación a trabajar en conjunto al amarrar los muros (Cevallos Salas, 2015). Sin embargo, en la construcción con tierra no es recomendable que los entrepisos o cubiertas trabajen como un diafragma rígido, más bien como un diafragma flexible, ya que al ser rígidos pueden provocar sobrecarga en los muros en plano, debido a las fuerzas transferidas por los muros fuera del plano, dañando gravemente los muros de carga.

Una variante utilizada como diafragma flexible y parcial es el entrepiso de madera contrachapada. La ventaja que ofrecen este tipo de diafragmas recae en su limitada rigidez, lo que evita la transferencia excesiva de carga a los muros, reduciendo el riesgo de fallo por cortante en estos (Michiels & Fonseca Ferreira, 2013).

En cuanto a la influencia del peso de los entrepisos y cubiertas en la vulnerabilidad de las construcciones con tierra no existe un consenso entre los especialistas en la materia, algunos sostienen que el peso agrava la fuerza sísmica y otros sostienen que la presión que ejerce la cubierta (o entrepiso) sobre los muros, es necesaria para que estos se mantengan juntos ante un evento sísmico. Sin embargo, a partir de un trabajo realizado por Natalia Jorquera (Jorquera Silva, 2013) se concluyó que el peso de la cubierta sí aplasta los muros, provocando su colapso. Además de encontrar que la viga de amarre o cadena, en conjunto con el entrepiso o cubierta, distribuye la carga y mantiene unidos los muros.

Se concluye que, además de buscar opciones más ligeras para cubiertas y entrepisos que posean la resistencia suficiente para conectar los muros y transmitir los esfuerzos, es fundamental evitar la concentración de cargas en los muros, a fin de prevenir el efecto de péndulo invertido (Vargas Neumann, 2013). Para ello, se utilizan collares o cadenas de arrastre. Estos elementos deben ensamblarse correctamente a los muros, prestando

especial atención a las esquinas y encuentros, con el objetivo de que tanto el entrepiso como la cadena funcionen conjuntamente como un diafragma (Guerrero Baca, 2007).

Ruta de evaluación desde el material conocido, la madera

También se deben tomar en cuenta las transiciones entre la pajarcilla y la estructura principal, cuya integración en las construcciones con tierra es una práctica común, ya que son materiales compatibles por sus características físicas, además de que ambos son relativamente fáciles de obtener en casi todas las zonas del país (Michiels & Fonseca Ferreira, 2013). La pajarcilla al ser una técnica de entramado, trabaja en conjunto con la estructura de madera para absorber las deformaciones causadas por las distintas cargas a las que está sometida una edificación.

Al buscar normas enfocadas al uso de la madera en entrepisos, las NTC sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones cuentan con el término de “sistema de piso ligero de madera”, definido como “aquellos formados por tres o más miembros aproximadamente paralelos y separados entre sí no más de 800 mm y unidos con una cubierta de madera contrachapada, de duelas de madera bien clavadas u otro material que proporcione una rigidez equivalente” (Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones Para El Diseño Estructural de Las Edificaciones, 2017).

Las NTC sugieren realizar pruebas de carga ya sea sobre prototipos, o modelos que produzcan fielmente las condiciones reales. Además, se sugiere que el método de ensaye se defina específicamente para cada caso. Para la evaluación de la estructura principal (madera) se determinó su cumplimiento a partir de criterios de diseño tales como la separación entre vigas, así como las dimensiones de éstas en función de la carga y el claro del entrepiso, ya que el interés recae en el relleno o “cubierta” de pajarcilla, lo que de acuerdo con la misma norma se puede realizar por métodos experimentales o teóricos.

Método de evaluación

Con todo lo anterior se postuló que, para determinar si un entrepiso semiprefabricado de pajarcilla, cumple con las demandas estructurales

establecidas en la normativa mexicana, se debe comenzar desde (1) la caracterización de tierra, pasando por, (2) la evaluación del material a flexión y (3) a compresión, lo que dará paso a la determinación de la mezcla a utilizar y (4) probar en las piezas modulares y la capa de compresión, para concluir con (5) la validación del entepiso, por lo que el diseño del sistema irá respondiendo a los resultados de cada etapa.

Al evaluar primero el material, se puede comprender la influencia mecánica de los distintos agregados que puede llevar la pajarilla y modificar sus concentraciones conforme los resultados que se van obteniendo. Dentro de las ventajas que se tienen por ser un prefabricado, es que la evaluación de los elementos modulares se realiza lo más parecido a su disposición final, contrario a lo que sucede con otras técnicas de construcción con tierra, donde se requiere probar secciones grandes y pesadas, ya que la respuesta mecánica recae más en su trabajo en conjunto que en la resistencia del material.

Diseño de mezclas

En el libro de “Construir con tierra aligerada” se presenta una tabla (Volhard, 2016d) donde se indican las cantidades aproximadas para lograr dichas densidades. Como la densidad implica solo la tierra y la paja, la tabla únicamente muestra las cantidades para estos dos componentes. Para corroborar las cantidades indicadas se realizó un muestreo de diseño de mezcla. Se fabricaron muestras cúbicas (10x10x10cm) y se determinó un factor de ajuste para cada densidad, ya que conforme la densidad aumenta, se requiere menor cantidad de mezcla por proporción de tierra.

Variables por estabilización

Como la tierra ha sido utilizada en combinación con otras sustancias y elementos estructurales debido a que se identifica como un material con poca resistencia a esfuerzos mecánicos. Lo anterior ha generado diversas técnicas de construcción con tierra, donde la interacción de los agregados con la tierra desarrolla un “trabajo en red” (Luis Fernando Guerrero Baca, 2020) para responder a los esfuerzos a los que estará sometido determinado elemento.

Por esto, se seleccionaron algunos materiales como variables en las evaluaciones mecánicas por tipo de estabilización: tierra, paja de trigo, agua, mucílago de nopal y pasta de cal. Como variables adicionales de análisis se consideró el proceso de compactación de las piezas y la densidad.

Figura 9.

Clasificación por tipo de estabilización.



Fuente: Elaboración propia

Evaluaciones (flexión-compresión)

La resistencia que puede llegar a presentar la tierra a flexión puede ser despreciable. Sin embargo, en la pajarcilla, la fibra absorbe parcialmente este esfuerzo, mientras que la tierra lo hace a compresión, generando una mezcla óptima para entrepisos o cubiertas.

Las evaluaciones de la mezcla a flexión se llevaron a cabo en la máquina de ensayos universales del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la UNAM. Se tomó como referencia la norma NMX-C-303-ONNCCE (Industria de La Construcción - Concreto - Determinación de La Resistencia a La Flexión Usando Una Viga Simple Con Carga En El Centro Del Claro, 2004). Aunque esta norma especifica una aplicación de carga de 10 kgf/cm^2 por minuto, enfocada a materiales más resistentes y frágiles como el concreto, se optó por revisar otras metodologías para mezclas de tierra a flexión. Se encontró que, en estos casos, la prueba se realizaba en función del desplazamiento (0.5 mm/min o 1 mm/min) y no de la carga. Estos ensayos de flexión fueron cruciales para determinar la mezcla óptima a emplear en las piezas prefabricadas o elementos modulares.

La evaluación de la mezcla a compresión se llevó a cabo tomando como referencia la especificaciones y métodos de ensayo establecidos en la normativa NMX-C-508-ONNCCE (Industria de La Construcción – Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados Con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo, 2014) que evalúa a compresión Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal, que a su vez se refiere a la NMX-C-036-ONNCCE (Industria de La Construcción - Mampostería - Resistencia a La Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines - Método de Ensayo, 2013). Para este caso, las probetas deben ser cúbicas de 5x5cm. Nuevamente se mantuvo la cantidad de probetas mínimas (tres), como en el caso de la prueba a flexión, se modificó unificó la aplicación de la carga (5 mm/min), realizadas todas las pruebas en la máquina de ensayos universales del LMSE. Este punto evalúa la mezcla que se utilizará para la capa de compresión. La incertidumbre y exactitud de los equipos utilizados para estas evaluaciones se presentan en la tabla a continuación.

Figura 10.

Prueba a compresión y flexión de la pajarcilla.



Fuente: Elaboración propia

Evaluación a piezas

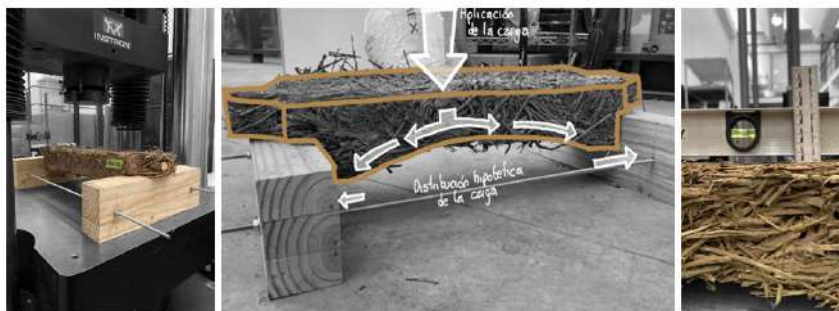
Con las pruebas a la pajarcilla (a flexión y compresión) el objetivo fue determinar la resistencia del material, bajo el supuesto de que, entre mayor resistencia se presente, mayor probabilidad existe de que al utilizar ese material en el elemento modular se cumpla lo establecido en la norma. Por su similitud con el sistema de vigueta y bovedilla, se tomó como referencia la evaluación de bovedilla de poliestireno a partir de la NMX-C-463-ONNCCE (Industria de La Construcción – Bovedilla de Poliestireno Expandido Para Losas de Entrepisos y Azotea de Concreto a Base de Viguetas Prefabricadas - Especificaciones y Métodos de Ensayo, 2009). Para este caso, el tener elementos modulares permite su evaluación a escala 1:1 y de forma similar a la que estarán sometidos en su colocación final.

El diseño por forma y el trabajo de esta técnica en conjunto con la estructura de madera fue clave para la propuesta, por lo que, para la evaluación de las piezas prefabricadas se adaptó un soporte que equivalió a las vigas del entrepiso, el cual se debe unir por algún elemento transversal. De este modo se evita que, ante la aplicación de la carga, las vigas de madera se separen y, además, se estaría representando el empuje que generan las piezas de los costados sobre éstas, anulando, el riesgo de volteo o separación.

Aunque la NMX-C-463-ONNCCE indica que se debe aplicar 125kgf en 1 minuto, al ser la primera vez que se evaluaban las piezas modulares y no conocer la respuesta mecánica, se decidió realizar la evaluación de forma escalonada hasta cumplir con lo establecido en la norma. En principio se retomó la aplicación de carga usada en las probetas, con un desplazamiento de 5mm/min, hasta llegar a aplicar la carga solicitada por la norma. Posteriormente, se repitió la evaluación por desplazamiento, esta vez utilizando tres tipos de tierra distinta. Además, con esa misma variable se realizaron las evaluaciones por carga, en primera instancia aplicando los 125kgf en 2 minutos y posteriormente en 1 minuto, realizando así el procedimiento tal cual lo indica la norma. En total se realizaron 24 pruebas, todas en la máquina de ensayos universales del LMSE.

Figura 11.

Prueba de piezas prefabricadas de pajarcilla.



Fuente: Elaboración propia

Validación del sistema

Así como cuando se evalúa un adobe, su resistencia como pieza no es escalable de la resistencia de un muro completo, se hace necesario estudiar y evaluar el entrepiso en su totalidad. Sin embargo, no existe un método específico para evaluar experimentalmente un entrepiso, ya que la norma NMX-C-406-ONNCE (Industria de La Construcción - Componentes Para Sistemas de Losas Prefabricadas de Concreto - Especificaciones y Métodos de Ensayo, 2019) sobre métodos de evaluación para los componentes de sistemas de losas de concreto prefabricadas, evalúa los elementos por separado, las normas técnicas complementarias indican que, en caso de no contar con evidencia suficiente, sea teórica o experimental, para considerar que la estructura satisface la seguridad estructural se deberán realizar pruebas de carga sobre prototipos o modelos que produzcan las condiciones reales.

Esto puede realizarse usando algún software de simulación alimentado de los datos obtenidos en las propias pruebas o en su defecto, realizar pruebas empíricas o de campo, como las observadas en los casos análogos. Cualquiera de los dos métodos, requiere el cálculo previo de la combinación de cargas de acuerdo con el apartado de pisos ligeros de madera de las NTC, donde se establece que se debe tomar la carga viva como una carga concentrada de 250 kgf para los elementos de soporte y de 1 kN (100 kgf) para el diseño de la cubierta (Normas Técnicas Com-

plementarias Sobre Criterios y Acciones Para El Diseño Estructural de Las Edificaciones, 2017).

Evaluaciones mecánicas del material

A flexión se realizaron un total de 58 pruebas, divididas en cinco series. En cada serie se analizó la influencia de un tipo de estabilización, con tres probetas por cada variación. La variación con mejor desempeño mecánico sirvió como base para la mezcla de las series subsecuentes. Mientras que las pruebas mecánicas aplicadas a la pajarcilla revelan los factores que influyen en la resistencia a flexión de esta mezcla. La variable que emergió como determinante en este estudio fue la longitud de la fibra, evidenciando un aumento notorio del 53% en resistencia al optar exclusivamente por fibras largas (de 10 a 15 cm), en comparación con fibras cortas (menores a 5 cm). Además, se observó un incremento del 32.06% al combinar fibras largas y cortas en la mezcla, lo que sugiere la importancia de la longitud de la fibra en la mejora de las propiedades mecánicas.

En cuanto a la densidad, se registró un aumento del 32% en la resistencia al flexionar las probetas cuando la densidad pasó de 800 kg/m³ a 1000 kg/m³. La forma de compactación también demostró ser un factor clave, ya que, aunque la compactación con prensa no afectó significativamente la resistencia a la flexión, sí contribuyó a reducir la desviación estándar de la densidad, señalando la importancia de la uniformidad en el proceso de fabricación.

Las pruebas con distintos agregados estabilizantes indicaron que la mezcla presenta un mejor desempeño mecánico a flexión cuando se compone únicamente de los elementos principales: agua, tierra y paja. Este hallazgo sugiere que la simplicidad en la composición puede ser clave para optimizar las propiedades mecánicas de la tierra aligerada.

Por su parte, a compresión un total de 27 pruebas fueron llevadas a cabo, divididas en tres series. En cada serie se examinó la influencia de un tipo de estabilización, con tres probetas por cada variación. A diferencia de las evaluaciones de flexión, en este caso no se evaluó la estabilización mecánica ni la variación en estabilización por armazón. La variación con mejor desempeño mecánico sirvió como base para las mezclas de las series subsecuentes.

Tabla 1.
Cambio de resistencia a flexión por variable evaluada.

	Manual densidad alta			Prensa densidad alta			10cm<Fibra<15cm			Arcillosa/Sin agregado		
Probetas	1000-M2	1000-M1	1000-M0	1000-P1	1000-P1	1000-P1	P10-15-M1	P10-15-M1	P10-15-M1	SA1	SA2	SA3
Densidad promedio kg/m3	977.72			981.30			789.70			863.90		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.45			0.43			0.50			0.96		
Ganancia	X			-0.02		Mpa	0.05	Mpa	0.48	kg/cm2		
				-4.64%			12.28%		108.22%			
	Manual densidad alta			Prensa densidad alta			10cm<Fibra<15cm			Arcillosa/Sin agregado		
Probetas	SA1	SA2	SA3	MN1	MN2	MN3	Pc1	Pc2	Pc3	MP1	MP2	MP3
Densidad promedio kg/m3	1042.82			1089.09			1044.75			1081.75		
Promedio de resistencia ruptura a 5mm (Mpa)	0.69			1.23			0.72			0.63		
Ganancia	X			0.54	Mpa	0.04	Mpa	-0.05	Mpa	-7.81%		
				79.43%			5.33%					

Fuente: Elaboración propia

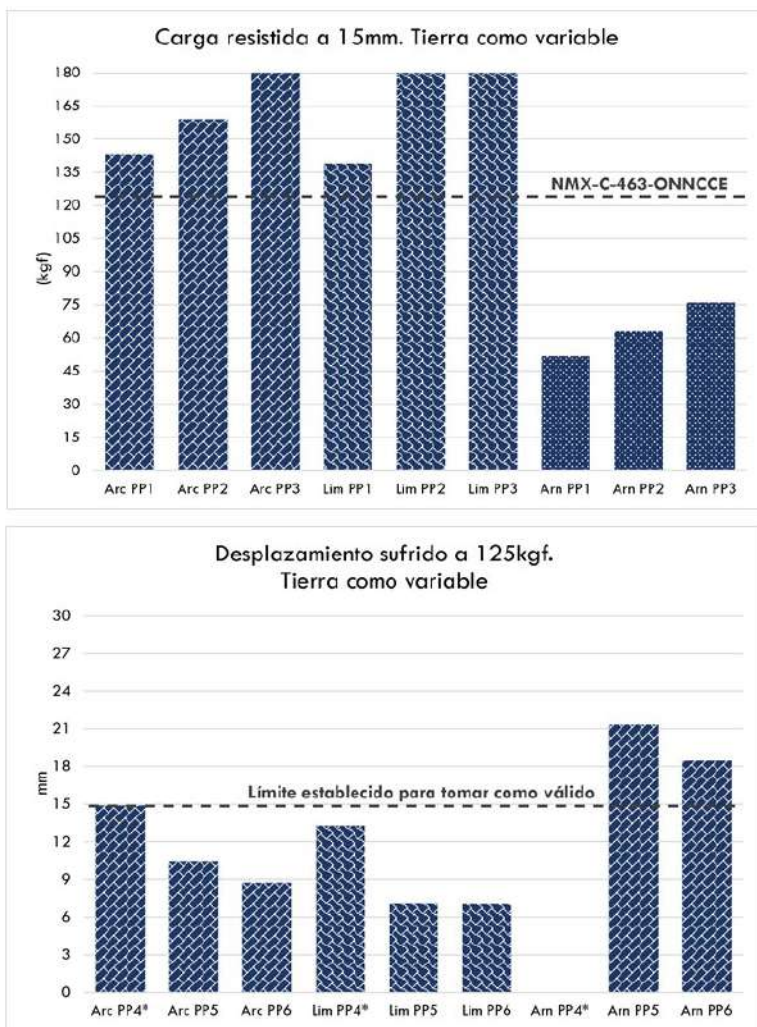
La mayor resistencia se logra con la mezcla de densidad alta, con un promedio de 990 kg/m^3 , y agregar mucílago de nopal en la pajarcilla aporta un aumento de cerca del 80%, por lo que resulta de interés su estudio a futuro. Aunque en las técnicas más utilizadas para muros, se han reportado resistencias de hasta 90 kg/cm^2 con tierra arenosa, en este caso, al estar mezclada con fibras, el mejor desempeño se logró utilizando tierra arcillosa o limosa. Se demostró que la prueba, análisis y modificación de los componentes ayudan a aumentar la resistencia de la pajarcilla. Como la tierra no es un material estandarizado, se deberá entender que cada caso será único, por lo que la evaluación particular de la pajarcilla se vuelve vital.

Evaluación de las piezas prefabricadas

Se realizaron 24 pruebas en total, divididas en dos series cuando se evaluó por desplazamiento y en una serie cuando se evaluó por carga. En cada serie se obtuvo el promedio de tres muestras (ver gráfica 1). Las variables evaluadas fueron la densidad, tipo de tierra además del método de evaluación con respecto a la forma de aplicación de la carga.

Como la NMX-C-463 pide aplicar una carga concentrada de 125 kg en 1 minuto sin presentar falla por corte o flexión, al hacer las pruebas a flexión de las probetas se podría tener un indicio de la futura aprobación por norma del elemento o no. Si bien no es escalable y en cada caso será distinto, por lo que se propone que desde la evaluación de las probetas a flexión se puede tener un indicio de qué mezclas cumplirán con la norma una vez sea implementada en la pieza prefabricada. De forma aproximada y sin tomar esto como un parámetro de cumplimiento, se encontró que resistiendo los 30kg en las probetas a flexión, se incrementa la posibilidad de cumplir con lo solicitado para las piezas prefabricadas. Así como en la evaluación a flexión, se valida a partir del promedio de mínimo tres piezas.

Gráfica 1.
Comparativa de evaluación de piezas prefabricadas.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados se ven favorecidos cuando la aplicación de la carga se realiza de forma rápida, tal como lo indica la norma (125kgf/1min), pero al transmitir este método a la forma en la que estarán siendo sometidas las

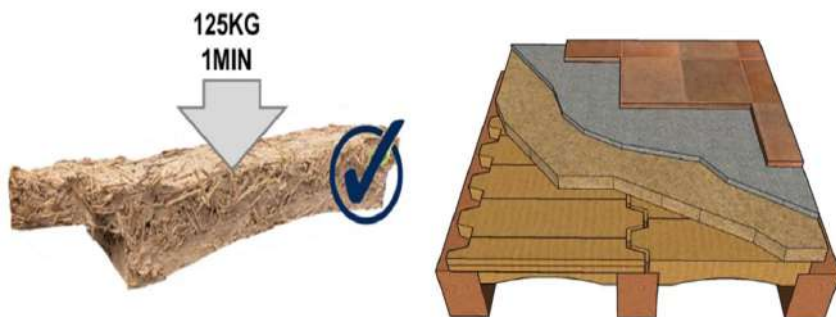
piezas en su vida útil, se puede decir que algunas zonas recibirán cargas durante un periodo largo de tiempo, mientras que otras estarán sometidas a impactos o cargas espontáneas, por lo que se recomienda realizar tanto la prueba por desplazamiento a fin de conocer la deformación y ductilidad de la pieza, así como la prueba por aplicación de carga en 1 minuto para cumplir con lo solicitado por norma.

Determinación de factibilidad del sistema

Como la norma establece que el método de ensayo seleccionado deberá definirse específicamente para cada caso de interés y, en caso de no tener la posibilidad de realizar una prueba del sistema a escala 1:1, se entiende que la validación del entrepiso completo se puede dar a partir de sus componentes y, de este modo, los elementos modulares que resistan los 125kgf solicitados por la NMX-C-463 se pueden tomar como válidos para aplicación constructiva, siempre y cuando, la madera de la estructura principal también cumpla con ello. Se recalca que de esta forma se estarían validando las partes del sistema y que la forma de validar el sistema en conjunto será la fabricación a escala real. Sin embargo, lo que se busca con este método es dotar de mayor seguridad previo a la ejecución de la prueba 1:1 o la construcción de éste.

Figura 12.

Validación del sistema por correlación.



Fuente: Elaboración propia.

Puesta en práctica

La propuesta se llevó a la práctica con la finalidad de despejar dudas sobre la aplicación constructiva, así como determinar si con la prefabricación se cumple con los postulados que dieron origen a la investigación. El Proyecto San Isidro, lugar de donde se obtuvo la tierra arcillosa, prestó el espacio, herramientas y materiales para llevar a cabo esta experimentación. Se proyectó colocar el entepiso semiprefabricado en una sección de 1.75×2.00 m, que forma parte de una obra en proceso en el centro de enseñanza.

Para elaborar las piezas prefabricadas se le realizaron algunas modificaciones al molde original, esto con el objetivo de eficientar el proceso al omitir los pasos de armado y desarmado del molde. Como la distribución de las vigas se hizo con base en las medidas del área a cubrir, se tuvieron separaciones entre vigas de 43 cm en los extremos y 52 cm en el claro central. En total, se elaboraron 33 piezas completas y dos mitades, con las proporciones y procedimientos establecidos en las pruebas realizadas.

La parte inicial de la experimentación se desarrolló dentro del curso de Inmersión en la Bioconstrucción a modo de taller, para mostrarle la propuesta a los asistentes y recabar información respecto a la comparación con el método tradicional que habían aprendido en días anteriores. Las opiniones con respecto a la reducción del desgaste energético de la propuesta semiprefabricada eran favorables, ya que, al poder hacerlo en de pie y en una mesa resultaba más cómodo y fácil, que hacerlo de rodillas.

Si bien la información anterior puede carecer de un aspecto cuantitativo al ser meramente cualitativa o de percepción, al comparar el rendimiento por m^2 de la cuadrilla 1-1 para fabricar el entepiso tradicional ($0.3 m^2$ /hora) resultó similar al de una persona con un molde (cinco pzas/hora o bien $0.375 m^2$). Aunque en el método tradicional ese rendimiento ya incluye la colocación, a la propuesta semiprefabricada se le debe agregar ese tiempo. Para colocar las 34 piezas sobre las vigas ya niveladas, una persona tarda alrededor de una hora, mismo tiempo en el que con el método tradicional se podría avanzar $0.09 m^2$.

Con esa información se podría concluir que los rendimientos son idénticos ($0.380 m^2$ /hora en ambos casos), pero la diferencia radica en que en la propuesta de prefabricación pueden trabajar varias personas al mismo tiempo, lo que elevaría el rendimiento de acuerdo con la cantidad

de moldes y personas. Otra ventaja que se encontró fue que, al ser un prefabricado, se puede avanzar en el entrepiso mientras se llevan actividades simultáneas, lo que impacta en los tiempos y, por tanto, en su costo.

Figura 13.

Fabricación de entrepiso semiprefabricado de pajarcilla.



Fuente: Elaboración propia

Vínculo de la investigación académica con la puesta en práctica

Este trabajo se avocó en evaluar mecánicamente la pajarcilla y determinar el nivel de cumplimiento con las normas mexicanas con las que se puede vincular, debido a la ausencia de estándares específicos. Sin embargo, se detectó que los criterios y métodos de evaluación para otros materiales terminan no siendo los más adecuados, por lo que requieren modificaciones y adaptaciones, lo que solamente se logrará a partir de un esfuerzo conjunto entre los que la investigan y los que la ponen en práctica.

Durante el proceso de prueba, experimentación y diseño del entrepiso siempre se tuvo en cuenta la forma en que esto podría llevarse a cabo en la práctica constructiva. El conocer de primera mano el proceso constructivo del método tradicional ayudó desde el establecimiento de variables y sus grupos, la forma de la pieza en función de la factibilidad de fabricación del molde y los ajustes. A pesar de ello, en la etapa final hubo algunas modificaciones y cambios, que, si bien fueron menores, solamente se pudieron visualizar al ponerlo en práctica.

Aunque la base de la investigación fue la comparación bajo ciertas normas, no se pretendía establecer una norma restrictiva que dicte resistencias a cumplir, en todo caso se buscarían métodos de evaluación. Lo anterior solamente será factible cuando sean propuestos contemplando los procesos, ambientes y recursos en los que se desarrolla esta arquitectura. Es frente a este contexto donde se remarca la necesidad de unir esfuerzos entre la academia que investiga y los constructores que la ejecutan, en pro de investigaciones que atiendan problemáticas reales con propuestas o respuestas aplicables.

Referencias

- Auroville Earth Institute. (s/f). Hourdi roofing. Architecture. Recuperado el 12 de noviembre de 2022, de <https://dev.earth-auroville.com/hourdi-roofing/>
- Caballero Cervantes, A. (s/f). Notas sobre bioconstrucción.
- Caballero Cervantes, A., & Guerrero Baca, L. F. (2021a). *Curso de Inmersión en la Bioconstrucción*.
- Caballero Cervantes, A., & Guerrero Baca, L. F. (2021b). *Entramados. En Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México* (1ra edición, pp. 87–97). Bonilla Artigas.
- Caballero Cervantes, A., Hernández Flores, H., & Sosa Contreras, A. (2022, abril 22). *Proceso constructivo de pajarcilla para entrepisos*.
- Casares Ruiz, G., & Gustamante Montoro, R. (s/f). *Arquitectura de tierra en el S.XXI*.
- Castañeda Nolasco, G. (2022). *Evaluación de la tecnología para techos Domotej. En Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*. (2da edición, pp. 141–226). Universidad Autónoma de Chiapas.
- Cevallos Salas, P. (2015). La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma. *Memorias 15 SIACOT “Tierra, sociedad, comunidad”*, 603–614.
- Daneels Annick. (2020). Introducción. En A. Dannels (Ed.), *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I* (1ra edición, Vol. 1, pp. 11–23). Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Dávila Urrejola, V., & Contreras Silva, J. (2022). *¿Qué es el adobillo? En Á. Riquelme Bravo* (Ed.), *El adobillo*. Cultura constructiva de Valparaíso (2da edición, pp. 11–19).
- Guerrero Baca, L. F. (2007). “Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva”. *Apuntes*, 20(2), 182–201.
- Gutierrez, A., Chandler, A., Shilova, E., Ayati, B., Nichols, P., Omowunmi Ogundare, F., Ciftci, B., Arvindkumar Patel, H., Taha, R., Ranasinghe, K., Sai Ganji, M., Borda, A.-M., Gillespie, A., Ukabhai Dungrani, M., Klimenteva, A., Henley, S., Tsakiridis, G., Nikitidis, P., & Singer, P. (2022). *Sugarcree. Slab report*. <https://uel.ac.uk/sites/default/files/uel-sugarcree-slab-report---7-nov-2022.pdf>
- Industria de la construcción – Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal - Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-508-2014, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. (2014).
- Industria de la construcción – Bovedilla de poliestireno expandido para losas de entepisos y azotea de concreto a base de viguetas prefabricadas - Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-463-2009 (2009).
- Industria de la construcción - Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto - Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-406-ONNCCE-2019 (2019).
- Industria de la construcción - concreto - Determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro, Pub. L. No. NMX-C-303-2004, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. (2004).
- Industria de la construcción - Mampostería - Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines - Método de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-036-ONNCCE-2013 (2013).
- Jorquera Silva, N. (2013). Culturas sísmicas en tierra. Estrategias locales de respuesta de la arquitectura de tierra chilena. *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, 19–31.
- Luis Fernando Guerrero Baca. (2020). “Sistemas constructivos, medio ambiente y preservación del patrimonio arqueológico de tierra”. En A. Dannels (Ed.), *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I* (1ra edición, Vol. 1, pp. 415–433). Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Michiels, T. L., & Fonseca Ferreira, C. (2013). “Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra”. *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, 31–46.
- Minke, G. (2006). *Earth as a building material: the essentials. En Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture* (English). Birkhäuser.
- Normas Técnicas Complementarias, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017).

- Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c. (2023). Catálogo de normas ONNCCE. ONNCCE.
- Sánchez Mora, R. (1983, noviembre). *Machimbloque de tierra comprimida estabilizada*. Tercer Simposio CIB/RILEM.
- Swallow brick: bloque para bioconstrucción. (s/f). Bloque aligerado de tierra y paja. Recuperado el 17 de noviembre de 2022, de <https://www.swallowbrick.com/bloque/>
- Vargas Neumann, J. (2013). “Consideraciones para incluir la técnica del tapial en la normativa de tierra peruana”. *Memorias 13 SIACOT* “Material universal, realidades locales”, 885–895.
- Volhard, F. (2016a). *Building with earth-a historical overview*. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth* (English, pp. 33–40). Birkhäuser.
- Volhard, F. (2016b). *Floors and ceilings*. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth* (English, pp. 107–118). Birkhäuser.
- Volhard, F. (2016c). *Light Earth Panels*. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth* (English, pp. 135–136). Birkhäuser.
- Volhard, F. (2016d). *Preparation of the light earth mix*. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth* (English, pp. 69–78). Birkhäuser.

Tierra compactada como material de construcción, evolución y retos actuales

Paula Florentina Barba Márquez*

Fernando Córdova Canela**

Cesar Armando Guillén Guillén***

Introducción

Las construcciones con tierra se han utilizado desde las primeras viviendas para los asentamientos humanos. Dentro de la construcción con tierra existen varias técnicas y clasificaciones, en esta investigación tomaremos la que agrupa las técnicas por método de elaboración por técnicas de fabricación (Guerrero, 2007). Dentro de éstas destaca la técnica de tierra compactada por su durabilidad, resistencia mecánica y menor consumo de agua en comparación con otras técnicas como el adobe (Gomaa *et al.*, 2023).

En los últimos 100 años, el proceso de fabricación de la tierra compactada ha evolucionado con procesos cada vez más estandarizados; pasando desde prensas manuales de madera hasta sistemas prefabricados con moldes de grandes dimensiones.

* Universidad Nacional Autónoma de México. paulaflorentinaaaa@gmail.com

** Universidad de Guadalajara. fernando.cordova@cuad.udg.mx

*** Universidad Nacional Autónoma de México. cguillenunam.mx

A pesar de las ventajas medioambientales y de confort térmico de los sistemas de muros con tierra compactada, su aplicación aún es limitada en comparación con sistemas prefabricados de concreto (Arduin *et al.*, 2022). Esto se debe a factores como la amplia variedad de tierras existentes, lo que implica factores como: la falta de una sola manera de caracterizarla, desconocimiento de la técnica, desestimación de los productos, altos costos, mano de obra especializada; todo esto dificulta su evaluación y la promoción de su uso (Muntohar *et al.* 2020).

El objetivo de esta investigación es documentar y analizar la evolución de los sistemas prefabricados de tierra compacta, identificando su avance cronológico, innovaciones, proceso de fabricación y sistemas de compactación, que permitan comprender sus ventajas y limitaciones. Particularmente, se busca poner en perspectiva los aportes de estos desarrollos en relación con las demandas de la construcción actual.

El estudio y documentación de los sistemas prefabricados de la construcción con tierra compactada permite comprender cómo la innovación tecnológica y las acciones de divulgación contribuyen a optimizar y promover su uso, por lo tanto, de mejorar y facilitar el proceso para que los sistemas constructivos base tierra compactada sea replicable en distintas escalas de edificación.

Antecedentes

Antecedentes de la arquitectura con tierra

La arquitectura con tierra se entiende como el proceso en el que el suelo natural es adaptado para formar elementos constructivos para espacios habitables. Se ha utilizado desde los primeros asentamientos humanos y se ha desarrollado a través de los siglos por medio de la transmisión de conocimientos y experiencias, y buscando la adaptación a recursos locales disponibles (Guerrero, 2007).

A partir del siglo XIX la arquitectura de tierra ha presentado una evolución acelerada, combinando los saberes tradicionales con métodos y tecnologías contemporáneas. (Gomaa *et al.*, 2023; Rigassi, 1985; Guerrero 2007). Esta evolución permitió varias clasificaciones de los sistemas constructivos con tierra, dos de ellas son las que propone por

el Centro de Investigación internacional sobre la construcción con tierra: *Craterre*, ubicado en Grenoble, Francia, la primera clasificada por el proceso de fabricación y la segunda, por la plasticidad de sus elementos (CRATerre-ENSAG, 2012). En esta investigación nos centramos en la de tierra compactada, porque además de las ventajas en sus características mecánicas que ya mencionamos, presenta la mayor evolución y cambios de fabricación.

Innovación y evolución de la tierra compactada

Entre inicios del siglo XXI y finales del XX, se comenzó a documentar la evolución de la tierra compactada. La innovación en la construcción con tierra puede dividirse en dos líneas principales (Houben, Guillaud, Dayre y CRATerre, 1989).

La primera, centrada en la innovación en sistemas y elementos constructivos, hace énfasis en el diseño, proceso de fabricación y producción de elementos con el objetivo de mejorar su eficiencia constructiva, facilitar su replicabilidad y producción en serie (o uniformidad). El cuidado y estandarización de la fabricación de construcción con tierra ha disminuido los tiempos de construcción y control de calidad de las piezas (Von Mag & Rauch, 2011; Fetdeterra, 2018).

La segunda se centra en la innovación en mezclas, principalmente en estabilizantes. Busca mejorar las propiedades mecánicas, así como su resistencia a la compresión y la durabilidad del material con diseños de mezcla, utilizando comúnmente cemento, cal, fibras naturales o sintéticas. Estas innovaciones, permiten que los BTC o piezas hayan aumentado su resistencia a la compresión, humedad y mantengan la estabilidad dimensional, contribuyendo a su aceptación en las construcciones contemporáneas (Fabbri *et al.*, 2021; Zardari *et al.*, 2018).

Sistemas representativos de prefabricados de tierra compactada

En la técnica de construcción con tierra han surgido sistemas específicos que buscan acelerar procesos de producción, mejorar la calidad y ampliar las posibilidades de diseño (hablando de sus dimensiones, geometrías, etcétera). Estos métodos combinan las técnicas tradicionales y la innovación, y han ido respondiendo a las necesidades de la construcción local como

la demanda de vivienda a bajo costo en Latinoamérica y África durante y después de la Segunda Guerra Mundial (Galindo-Díaz, J., *et al.*, 2023).

Agrupamos estos sistemas en tres principalmente: la tapia prefabricada, los bloques de tierra comprimida (BTC) de tamaño estándar o tradicionales, y los BTC de gran formato, los cuales se describen a continuación:

1. Tapia prefabricada: Son bloques de tierra compacta con un espesor mínimo de 20 cm y de longitud variable según el encofrado o cimbra con que se elaboran, son fabricados en talleres especializados, por medio de la compactación de capas de 15 cm a 20 cm, compactadas con un pisón hidráulico, tienen un control de calidad control de mezcla y de presión con acabados uniformes, una característica importante para prefabricados comerciales, permiten la construcción rápida de muros monolíticos, pero su traslado a sitio dificulta la logística y costos de obra (Von Mag & Rauch, 2011).
2. BTC tradicionales: Son piezas de tierra compactadas con una prensa por palanca manual o presas hidráulicas, las piezas son normalmente de dimensiones de 29 cm de largo, por 14 cm de ancho por 9 cm de alto, estabilizadas de forma mecánica, con agregados de estabilizante químico o no, de uso principalmente difundido en vivienda social. Su producción puede ser con prensa manual o mecanizada (Rigassi, 1985; Galindo-Díaz *et al.*, 2023).
3. BTC de gran formato: Son bloques de dimensiones de longitud mayores a 40 cm y alturas y ancho variables según el molde de fabricación. Compactados siempre de forma mecánica con prensas hidráulicas, estos bloques permiten una industrialización y prefabricación; logran un ahorro de tiempo de la obra (por su colocación) de hasta el 30%. También permiten aprovechar la tierra local, garantizar una uniformidad en la textura de las piezas con el control de su mezcla y compactación (Fabbri *et al.*, 2021; Von Mag & Rauch, 2011).

La evolución de la construcción con tierra compactada muestra cómo el conocimiento tradicional se ha transformado por medio de innovaciones técnicas y procesos estandarizados; dejando ver que ha sido una técnica de construcción adaptable a contextos históricos y económicos, por lo que ha logrado permanecer hasta ahora. El estudio de su transformación y la identificación de las características de

cada sistema son necesarios para valorar su aporte a la arquitectura y poder adaptarse a las demandas de la construcción contemporánea.

Metodología

Esta investigación se llevó a cabo de manera analítica, por medio de tres principales fases, centradas en la sistematización de la información sobre elementos prefabricados de tierra compactada. Con el propósito de visibilizar la evolución histórica y tecnológica de los prefabricados de tierra compactada y detectar los retos actuales en su aplicación.

Etapas 1. Revisión documental y selección de fuentes a través de buscadores Académicos de Google Académico y Biblioteca Digital UNAM, productos existentes en el mercado, manuales técnicos, normatividades y artículos académicos relacionados con la construcción con tierra compactada.

Etapas 2. Análisis de evolución de técnicas. En esta etapa se recopiló e identificó la información de la evolución de técnicas desde la aparición de las primeras prensas manuales hasta sistemas de fabricación mecanizados, hidráulicos y neumáticos. Por lo que se identificaron los cambios a través del tiempo y las áreas de oportunidad y deficiencias.

Etapas 3. Elaboración de herramientas gráficas para presentar el análisis y resultados de la información seleccionada se utilizaron dos herramientas.

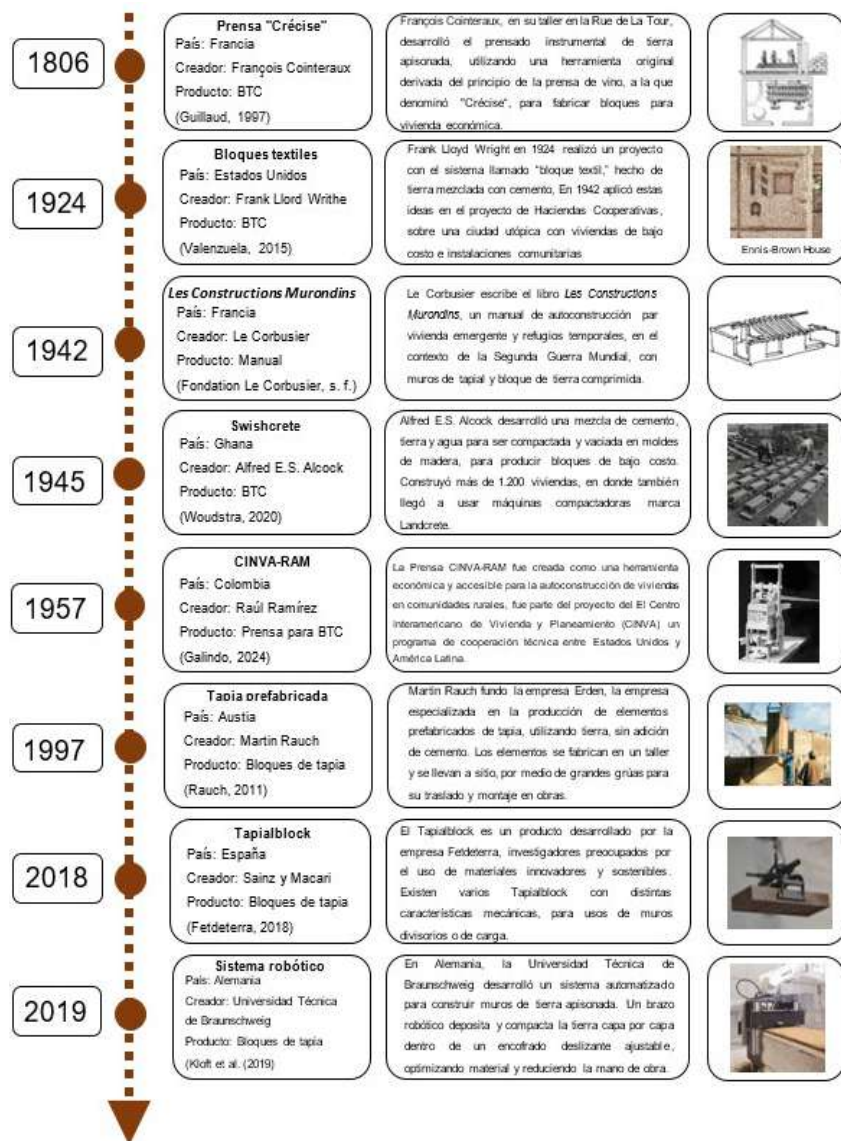
- Línea del tiempo. Para representar cronológicamente, los sistemas constructivos de muros y productos destacados, mostrando los cambios en su proceso de fabricación y uso.
- Tabla comparativa. Agrupa los productos prefabricados siguiendo los tipos de bloque, dimensiones, método de compactación, resistencia a la compresión, densidad y peso de la pieza.

Resultados

La línea del tiempo evidencia la evolución de técnicas de fabricación, geometrías y prensa utilizados para la creación de productos prefabricados con tierra compactada, desde los métodos manuales iniciales hasta los sistemas sistemas robóticos en desarrollo.

Figura 1.

Línea del tiempo del avance cronológico de sistemas y productos de construcción con tierra compactada.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.

Tabla comparativa de sistemas prefabricados de tierra compactada.

Sistema de muro	BTC Tradicional (estabilizado con cemento)	BTC Perforado	BTC de gran formato	Tapia prefabricada
Dimensiones de la pieza (cm) (largo, ancho, alto)	29,5 x 14 x 9 cm	29 x 14 x 9,5 cm	80 x 30 x 15 cm	120 x 80 x 30 cm
Sistema de compactación	Prensa Hidráulica	Prensa CINVA RAM	Prensa Hidráulica	Pisón manejado por mano de obra
Resistencia a la compresión (MPa)	8 MPa	1,17 MPa	6 MPa	1.4 a 2.2 MPa
Peso de la pieza (kg)	7.24 kg	7.70 kg	68.4 kg	633 kg
Densidad (kg/m³)	1950 kg/m³	2021.89 kg/m³	1950 kg/m³	2200 kg/m³
Forma de unión	Mortero e estructural	En seco	Mortero	En seco
Uso Sugerido	Muros de carga, muros de revestimiento interior, revestimientos, fachadas ventiladas protegidas	Vivienda, muro divisorio	Muro de carga interiores, revestimientos	No indicado
Referencia	(Terrabloc, 2025)	(Medina & Medina, 2011).	(Terrabloc, 2025)	(Terrio, 2025)

Fuente: Elaboración propia

Características identificadas

El BTC tradicional estabilizado con cemento alcanza la mayor resistencia a la compresión (8 MPa), superando a los demás sistemas. Mientras que el BTC perforado presenta la resistencia más baja (1.17 MPa), lo que limita su uso estructural.

El BTC de gran formato logra una resistencia intermedia (6 MPa), menor que la del BTC tradicional pero superior a la de la tapia prefabricada (1.4–2.2 MPa).

En cuanto a peso, el BTC de gran formato (68.4 kg) es casi 10 veces más pesado que un BTC tradicional (~7 kg) y más de 8 veces más pesado que un perforado (~7.7 kg). La tapia prefabricada (633 kg) resulta casi 9 veces más pesada que un BTC de gran formato y más de 85 veces más pesada que un BTC tradicional. La densidad de los materiales se mantiene en un rango de 1950–2200 kg/m³. En estos casos, los sistemas compactados con prensas hidráulicas obtienen la mayor resistencia a la compresión.

Discusión

El análisis de la evolución de la construcción con tierra compactada, representada en la línea del tiempo, muestra cómo la tierra pasó de ser un material asociado a técnicas artesanales a sistemas industrializados, con procesos de compactación mecanizada y prefabricación que permiten mayor control de calidad y escalabilidad.

En tabla comparativa de sistemas actuales, el BTC tradicional estabilizado con cemento alcanza resistencias estructurales, aunque requiere de un mayor esfuerzo en mano de obra por la dimensión de sus piezas. El BTC perforado y compactado con presa manual, tiene una menor resistencia a la compresión, pero es más rápido de construir gracias a las uniones de ensamble que no requieren la colocación de mortero. El BTC de gran formato se puede utilizar en muros de carga y revestimientos y requiere menor uso de mano de obra para su colocación debido a sus dimensiones, pero también requiere de uno de grúas mecánicas para su traslado. La tapia prefabricada también tiene la desventaja de requiere grúas para su traslado debido al peso de las piezas, pero tiene la ventaja de no requerir prensas hidráulicas y lograr bloques de grandes dimensiones.

Así, los resultados muestran que la evolución de la tierra compactada no responde a una sola forma lineal, sino a procesos de adaptación técnica según los retos constructivos de cada contexto social y económico. Hoy existen sistemas con enfoques distintos, ya sea que se busque para aplicaciones estructurales, para menor utilización de mano de obra, o para evitar el uso de mortero.

Conclusiones

El análisis de la evolución de la tierra compactada muestra su capacidad de adaptarse a distintos contextos históricos y tecnológicos. Cada sistema presenta ventajas y limitaciones: el BTC tradicional destaca por su alta resistencia a la compresión, el perforado por su facilidad de montaje, el de gran formato por la reducción de juntas y la tapia prefabricada por su industrialización, aunque enfrenta retos vinculados con el peso y la manipulación.

Conocer las características de cada técnica y su evolución es fundamental para seleccionar la más adecuada según las condiciones constructivas y los requerimientos estructurales. La tierra compactada no se trata de un sistema obsoleto, sino de una técnica en constante transformación, cuyo estudio y documentación resultan fundamentales para promover y adaptar su uso frente a los retos de la arquitectura contemporánea.

En futuras líneas de investigación, se plantea el desarrollo de moldes y prensas que integren las ventajas de los distintos sistemas constructivos de tierra compactada: resistencia, rapidez de montaje, reducción de juntas e industrialización. Esto permitiría avanzar hacia tecnologías híbridas que optimicen el desempeño estructural, faciliten los procesos constructivos y tengan un menor impacto ambiental.

Referencias

- Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. D. L. M., & Rocha, F. (2022). "Life cycle assessment (LCA) in earth construction: a systematic literature review considering five construction techniques". *Sustainability*, 14(20), 13228.
- CRATerre-ENSAG. (2012). *World heritage inventory of earthen architecture*. Authors: D. Gandreau & L. Delboy.

- Fabbri, A., Morel, J. C., Aubert, J. E., Bui, Q. B., Gallipoli, D., Ventura, A., ... & Abhilash, H. N. (2021). "An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterisation of earth-based building materials and elements". *Construction and Building Materials*, 269, 121244.
- Fetdeterra. (2018). *Tapialblock: Prefabricated compressed earth blocks*. [Documento técnico]. España.
- Galindo-Díaz, J., et al. (2023). "Historical development and modernization of compressed earth blocks". *Materials Today: Proceedings*, 60, 1523–1532. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.004>
- Gomaa, M., Schade, S., Bao, D. W., & Xie, Y. M. (2023). "Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect". *Journal of Cleaner Production*, 398, 136569.
- Guerrero Baca, L. F. (2007). "Arquitectura en tierra: Hacia la recuperación de una cultura constructiva". *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural-Journal of Cultural Heritage Studies*, 20(2), 182-201.
- Guillaud, H. (1997). *Les grandes figures du patrimoine régional Rhône-Alpes François Cointeraux (1740-1830) pionnier de la construction moderne en pisé*.
- Houben, H., Guillaud, H., Dayre, M., & Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Villefontaine, Isère). (1989). *Traité de construction en terre* (Vol. 72). Marseille: Parenthèses.
- Kloft, H., Oechsler, J., Loccarini, F., Gossler, J. y Delille, C. (2019). *Fabricación robótica de componentes a partir de tierra apisonada* (traducido del alemán). Dtsch. BauZeitschrif, 54, 59.
- Medina, K. T. A., & Medina, Ó. H. (2011). "Bloque de tierra comprimida como material constructivo". *Facultad de Ingeniería*, 20(31), 55-68.
- Muntohar, A. S., et al. (2020). "Optimizing compressed earth blocks". *Construction and Building Materials*, 248, 118528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>
- Projets > Maisons Murondins, Sans lieu, 1940. (s. f.). *Fondation Le Corbusier*. Recuperado de <https://www.fondationlecorbusier.fr/oeuvre-architecture/projets-maisons-murondins-sans-lieu-1940/>
- Rigassi, V. (1985). *Compressed earth blocks: Manual of production*. Network. GATE/BASIN, 1, 1-143.
- Terrabloc. (2025). *Fiche produit Terrabloc 2025* [Ficha técnica].
- Valenzuela, D. M. G. (2015). ¿Y la transferencia de las buenas prácticas de construcción con tierra? In *Tierra, sociedad, comunidad: 15 seminario Iberoamericano de arquitectura y construcción con tierra* (pp. 492-499). Universidad de Cuenca.
- Von Mag, A., & Rauch, M. (2011). "Paredes de tapial y su industrialización (encontrados y sistemas de compactación)". *Informes de la construcción*, 63(523), 35-40.

- Woudstra, RRL (2020). Planificación de la «ciudad multirracial»: arquitectura, descolonización y el diseño de la estabilidad en el África británica (1945-1957) (Tesis doctoral, Instituto Tecnológico de Massachusetts).
- Zardari, M. A., Lakho, N. A., & Amur, M. A. (2018). “Structural behaviour of large size compressed earth blocks stabilized with jute fiber”. *Construction and Building Materials*, 192, 650–660.

Metodología para el desarrollo de sistemas constructivos tipo tapias en México

Alejandro Isidro Jiménez Sandoval*
Fernando Córdova Canela**
Alberto Muciño Vélez***

Introducción

El propagado uso de materiales industrializados como cemento, acero o ladrillo dentro de la industria de la construcción constituye un importante componente del problema de contaminación al medioambiente. Por este motivo, instituciones internacionales han impulsado la descarbonización de la industria mediante la promoción de materiales alternativos con menor impacto ambiental (Naciones Unidas, 2023). Una de las alternativas identificadas es la construcción con muros de tierra compactada, que se trata de un material natural que se puede encontrar en el mismo sitio donde se construye, lo que reduce la huella ecológica derivada del transporte y procesamiento (Morel, *et al.*, 2021). No obstante, para poder implementar estos sistemas dentro de la República Mexicana se requie-

* Universidad Nacional Autónoma de México. alejandroisidro.jimsan@comunidad.unam.mx

** Universidad de Guadalajara. fernando.cordova@cuad.udg.mx

*** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

ren metodologías que permitan avanzar hacia la tecnificación de los procesos y, de este modo, asegurar que los sistemas sean replicables y cumplan con requerimientos de construcción nacionales. Actualmente existe únicamente una norma en México referente a construcción con tierra, siendo la NMX-C-508-ONNCCE-2015 para bloques de tierra compactada estabilizados con cal, lo que limita los sistemas constructivos con tierra que pueden aprovecharse en el país. Con esto en mente, el presente capítulo tiene como objetivo la identificación de una metodología a seguir en el desarrollo de mezclas para edificación de muros de tierra compactada y su ensayo a la compresión mediante la búsqueda y reconocimiento de procesos aplicados en la literatura y el contraste de los resultados obtenidos en investigaciones previas para delimitar los posibles alcances que resulten de su aplicación. Al presentar esta metodología se pretende que, a través de un análisis crítico de la literatura que identifique, evalúe y sintetice metodologías existentes para el desarrollo de sistemas de muros de tierra compactada a nivel internacional, se facilite el desarrollo futuro del sistema en México y permita su aplicación conforme a sus características particulares.

Antecedentes

Los procesos de extracción e industrialización, así como de puesta en obra de materiales industrializados para la industria de la construcción generan de forma global aproximadamente del 20% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero por actividad humana, así como el 25% de los desechos sólidos generados a nivel mundial (Morel, *et al.*, 2021). Es por esto por lo que países como México, donde se utilizan materiales procesados para la edificación del 92% de los proyectos de casa habitación, se han sumado a iniciativas mundiales para la búsqueda de materiales alternativos que representen un menor impacto ambiental.

Como parte de estas iniciativas son de notar las taxonomías verdes, sistemas para la clasificación y promoción de actividades económicas y financieras que se consideran capaces de aportar significativamente en los procesos de transición hacia economías bajas en carbono; además de presentar a los distintos actores que pudieran tomar parte de estas industrias con criterios técnicos y metas para alcanzar en la búsqueda de este

cambio de paradigma (United Nations Environment Programme, 2024). La “Taxonomía Sostenible de México”, publicada en 2023 con el afán de facilitar la identificación de sectores y prácticas de mayor relevancia en el ámbito medioambiental y social para poder abordar los objetivos de cambio climático y ciudades sostenibles, reconoce a las industrias de la construcción y la manufactura de materiales para la construcción como cemento o acero, como parte de los seis sectores clave en este objetivo (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2023).

Si bien la taxonomía se centra en la aplicación de buenas prácticas para mejorar la eficiencia energética o en la implementación de materiales alternativos que reduzcan la polución generada por la producción de los materiales más utilizados en la industria, principalmente el cemento. Sistemas constructivos como los muros de tierra compactada atienden a los objetivos para descarbonización puesto que su materia prima se trata de un material natural que se extrae directamente del sitio donde se emplaza y que hace uso de un recurso comúnmente desechado, mitigando el impacto ambiental característico de materiales procesados al no tener que transportarlo ni procesarlo para su aplicación (Morel, *et al.*, 2021). Ahora bien, es importante resaltar que para mejorar el comportamiento mecánico de estos elementos constructivos comúnmente se introduce un estabilizante a la mezcla, sobre todo cemento, en la actualidad existe una búsqueda por aditivos alternativos como bioenzimas (Honne Basanna, *et al.*, 2020) o polímeros naturales (Losini, *et al.*, 2022) para reducir o eliminar completamente la aplicación de cemento.

Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante un enfoque documental empleando el método analítico-exploratorio, mismo que se consideró el más apropiado para el objetivo del estudio, considerando lo siguiente:

- Exploratorio: Permite investigar dentro del campo de estudio de los sistemas de muros de tierra compactada a nivel internacional que, si bien existe en México, no se ha sistematizado o adaptado de forma específica a la normativa dentro del contexto mexicano.
- Analítico: Permite el análisis crítico de metodologías, normas y diseños de mezcla existentes para identificar sus principios, requisitos y resultados.

- **Síntesis:** Permite integrar los elementos de las normas, procesos y diseños de mezcla hallados para proponer una metodología coherente que sirve como marco de referencia para el desarrollo de sistemas constructivos de tierra compactada en México.

Para cumplir con este objetivo, se utilizaron motores de búsqueda como Google Scholar y la Biblioteca Digital UNAM para realizar la pesquisa de artículos, libros y documentos afines sobre los temas descritos a continuación:

- **Normativas y estándares internacionales:** Refiriéndose a normas, técnicas, códigos de construcción o manuales de buenas prácticas de países con amplia tradición de construcción con tierra compactada.
- **Diseños de mezcla comprobados:** Artículos científicos, tesis doctorales y casos de estudio documentados, preferentemente aquellos que hayan sido integrados como parte de un documento indexado o repositorios académicos, que presenten métodos replicables y ahonden en las proporciones de los materiales, sus procesos de elaboración y los resultados de sus pruebas mecánicas.
- **Contexto mexicano:** Literatura y documentación sobre las normativas locales, así como de los materiales que pueden encontrarse en la región y las prácticas constructivas tradicionales.

Es imperante reconocer que el método analítico-exploratorio implementado en la presente investigación cuenta con limitantes, siendo la principal de ellas el alcance de la propuesta metodológica desarrollada, misma que se limitará al aspecto teórico normativo. De igual forma, se entiende que una validación empírica de mayor certeza de esta propuesta requiere de un proceso experimental posterior en que se incluyan la elaboración de mezclas y probetas para su posterior ensayo a distintas pruebas de laboratorio que verifiquen el cumplimiento de los parámetros de resistencia establecidos en la metodología, fase que no se contempla dentro de los alcances de la presente investigación.

Factores del suelo y el sistema constructivo

Los muros de tierra compactada, o tapias, son sistemas constructivos en los que se deposita tierra dentro de estructuras de madera o acero para posteriormente ser compactadas por capas hasta completar el elemento

arquitectónico y han existido en México desde antes de la Conquista, siendo parte fundamental de templos y pirámides como las encontradas en Tenochtitlán, si bien la introducción de encofrados de identifica como herencia española (Baca y López, 2016).

Al momento de comenzar a trabajar con tierra es importante conocer las características del suelo, dentro de las que se han identificado previamente en la literatura como relevantes para determinar si el suelo puede ser incorporado a un sistema de tapia son la textura o granulometría (referente a los porcentajes de agregados finos y gruesos), así como sus Límites de Atterberg (entendidos como el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) (Burroughs, 2010). En caso de que el suelo planteado no cumpla con los rangos de granulometría o de plasticidad adecuados para la elaboración de muros de tierra compactada, se puede realizar un proceso de reconstitución, el cual consiste en la adición de material inerte; por ejemplo, polvo de cantera, para que su comportamiento se asemeje en mayor medida a los rangos requeridos (Honne Basanna, *et al.*, 2020).

Con respecto a los factores que se evalúan en el sistema para determinar su capacidad de operar óptimamente como elemento constructivo, se encontró que aquel que toma mayor peso durante la evaluación de la piezas es su resistencia a la compresión, toda vez que esta característica determina su capacidad para soportar cargas verticales (Morel, *et al.*, 2021), y usualmente se evalúan con uno de dos métodos: mediante ensayo de probetas a escala o alternativamente con núcleos extraídos de secciones de muro, siendo la primera la más típicamente empleada (Ciancio y Gibbings, 2012).

Otro componente relevante para el diseño de mezcla es el contenido de agua empleado, con investigaciones previas definiendo el rango del 9,5 al 11% de contenido de agua como el óptimo para la fabricación de tapias, resaltando que mezclas con menos del 8% presentan humedecimiento insuficiente para trabajar el material y aquellas que incluyen un contenido mayor al 12% tienden a sufrir de encogimiento y compactación deficiente (Jayasinghe y Kamaladasa, 2008).

Procesos de caracterización

En cuanto al proceso de caracterización, éste tiende a realizarse conforme al Sistema Universal de Caracterización de Suelos, para el que se identificó

la norma ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (ASTM International, 2017), de la cual se derivan dos normas con respecto a los distintos procesos de caracterización:

- Para el análisis granulométrico se utiliza la norma ASTM C136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- Para el análisis de límites de Atterberg, entendidos como los límites de distinción entre los distintos estados de consistencia de los suelos, se identificó la norma ASTM D4318-17 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

Estas normas establecen una serie de términos que resultan necesarios para entender los resultados de la caracterización, mismos que se desglosan a continuación:

Tabla 1

Tamaño de partícula para agregados del suelo y los tamices usados para su separación.

	Tipo	Tamaño de partícula	No. Tamiz Est. Americano que pasa	No. Tamiz Est. Americano donde es retenido
Agregados gruesos	Gravas	Menor o igual que 75 mm y mayor a 4.75 mm	-	4
	Arenas	Menor o igual que 4.75 mm y mayor a 0.075 mm	4	200
Agregados finos*	Limos	Menor o igual a 0.075 mm	200	-
	Arcillas			

*Con el objetivo de facilitar el análisis de granulometría y evitar requerir de procesos adicionales al tamizado se agrupan los agregados finos conforme al tamaño de partícula, las pruebas de límites de Atterberg permiten diferenciar entre finos limosos o arcillosos.

Fuente: elaboración propia con datos de ASTM International, 2017.

Tabla 2.
Descripción de los Límites de Atterberg.

Límites de Atterberg		
Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
Contenido de agua requerido para que el suelo de encuentre entre los estados semilíquido y plástico	Contenido de agua requerido para que el suelo se encuentre entre los estados plástico y semisólido	Rango de contenido de agua donde el suelo tiene un comportamiento plástico. Diferencia entre límite plástico y líquido

Fuente: elaboración propia con datos de ASTM International, 2017.

Una vez entendidos estos conceptos, es posible discutir sobre los rangos dentro de los cuales previas investigaciones han encontrado se encuentran los suelos que típicamente tiene un comportamiento óptimo al momento de incorporarlos dentro de una tapia, destacando lo siguiente:

- En el caso de la granulometría, investigaciones anteriores sugieren que los porcentajes ideales se encuentran dentro de los rangos de entre un 10-40% para los agregados finos, mientras que, en el caso de los agregados gruesos, el contenido debe ser de entre el 35-65% (Arslan, *et al.*, 2017). Con respecto a esta proporción, históricamente los que mayor éxito han presentado durante el proceso de construcción son los que contienen un 30% de agregados finos y un 70% de agregados gruesos (Honne Basanna, *et al.*, 2020).
- Para los Límites de Atterberg, aquellos suelos que se estabilizan correctamente y adquieren resistencias a la compresión adecuadas para su aplicación en muros de tierra compactada son aquellos que cuenta con un Índice de Plasticidad menor de 15 (Burroughs, 2010).

Procesos de ensayo a la compresión

La normativa en cuanto a los procedimientos de ensayo a la compresión para sistemas constructivos a base de tierra suele variar considerablemente entre países y en algunos casos únicamente están normados ciertos sistemas (Cid, Mazarrón y Cañas, 2011). Así ocurre con México, donde únicamente podemos encontrar la norma NMX-C-508-ONNCCE-2015 refe-

rente a bloques de tierra compactada estabilizados con cal, por lo que no se cuenta con una norma específica que regule o establezca parámetros de resistencia a la compresión para tapias. Es por esto por lo que se realizó un mapeo de las zonas donde existe una tradición de construcción con tierra a nivel internacional, contrastando esta huella con las zonas de alto y muy alto riesgo sísmico (dentro de las cuáles se encuentra la República Mexicana) y la identificación de naciones que cuenten con normativas vigentes para tapias con previsiones sísmicas (ver Figura 1).

Figura 1.

Mapa de regiones con tradición de construcción con tierra, zonas con alto a muy alto riesgo sísmico y normas para tapias con previsiones sísmicas.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los hallazgos derivados de este mapeo destacan dos normativas, la primera de ellas es la norma estadounidense ASTM E2392/ E2392M-10(2016) Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, cuya importancia radica en la cercanía geográfica que tiene su país de origen con México, además de contar con suelos de características

similares; por ejemplo, en ambas naciones se encuentran suelos oscuros de alto contenido de materia orgánica, denominados feozems en México y udolls en los Estados Unidos (ISRIC, S/F). Esta normativa, a su vez, redirige hacia las normas neozelandesas NZS 4297, NZS 4298 Y NZS 4299 en el caso de trabajar con tierra sin estabilizar o, en caso contrario, sugieren tomar como referencia para el diseño de elementos de tipo tapia a normativa local sobre elementos de concreto si es que se trabaja con mezclas estabilizadas, particularmente si se hace con cemento (ASTM, 2016).

La mención de las normas neozelandesas por la norma norteamericana es de notarse, puesto que dicha normativa destaca en el entorno internacional por contar con una descripción minuciosa de los materiales y procesos de ensayo y fabricación para distintos sistemas constructivos con tierra, dentro de los cuales podemos encontrar a la tapia (Thompson, Augarde, y Osorio, 2022).

En cuanto a lo indicado por las distintas normas identificadas, el presente documento se centrará en los requerimientos de resistencia a la compresión, factor previamente identificado como imperante en el análisis de la factibilidad para funcionar correctamente como parte del sistema. Si bien la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE-2015 se centra en bloques de tierra compactada y no en tapias, sus requerimientos se toman como marco de referencia para las resistencias que deben ser capaces de alcanzar las probetas que se sometan a compresión con la intención de utilizar su mezcla como parte de un muro de tierra compactada, toda vez que se trata de la única norma existente en el país y, por lo tanto, constituye un referente regional para sistemas similares. En este sentido, la resistencia a la compresión requerida por las normas neozelandesas, así como la metodología a seguir para la fabricación y posterior ensayo de probetas, también se toma en consideración por ser una norma de carácter internacional con amplio reconocimiento y que contiene previsiones específicas para el sistema constructivo deseado. Con esto en mente se determinan los siguientes requerimientos de resistencia a la compresión para considerar al momento de desarrollar una mezcla para tapia:

- Si bien la NZS 4298 2024 indica una resistencia a la compresión mínima de 1.4 MPa, se tomará como mínima para su uso en muros no estructurales la resistencia de 2.94 MPa (30 kg/m²) y para muros estruc-

turales de 5.88 MPa (60 kg/cm²) conforme lo establecido por la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE-2015.

Diseño de mezclas

La adición de estabilizantes a los diseños de mezcla se ha vuelto una práctica común dentro de la industria, ya que estos aditivos permiten mitigar deficiencias del material, principalmente su resistencia a la compresión, o dotarlo de características adicionales, con el cemento Portland siendo un estabilizante popular por su capacidad de mejorar considerablemente la resistencia a la compresión del material (Ávila, *et al.*, 2022). Actualmente, si bien el cemento continúa siendo el estabilizante más propagado, se han desarrollado distintas investigaciones para poder aplicar aditivos alternativos que reduzcan o eviten la incorporación de cemento a la mezcla. A continuación, se enlistan algunas investigaciones con estas características que pudieran servir como punto de referencia en el desarrollo de mezclas para su aplicación en tapias:

Tabla 3.

Investigaciones con distintos estabilizantes y las resistencias a la compresión alcanzadas.

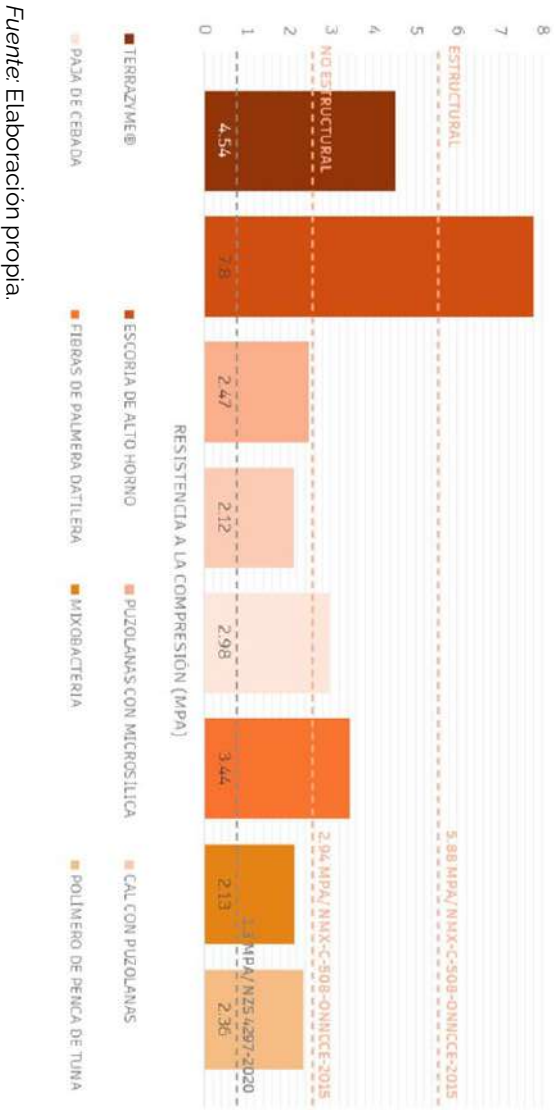
Artículo	Fuente	Estabilizante	Resistencia a la compresión
<i>Estabilización de suelos con cal y puzolanas</i>	Baca y López, 2016	Cal y polvo de ladrillo triturado	2.12 MPa
<i>Uso de biopolímeros en la prefabricación de muros de tapia</i>	Barrera, 2022	Polímero de penca de tuna	2.36 MPa
<i>The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts</i>	Toufigh y Kianfar, 2018	Puzolanas con humo de sílice	2.47 MPa

<i>Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study</i>	Koutous y Hilali, 2021	Fibras de paja de cebada	2.98 MPa
		Fibras de palmera datilera	3.44 MPa
<i>Role of stabilizers and gradation of soil in rammed earth construction</i>	Honne Basanna, et al., 2020	Bioenzima derivada de la caña de azúcar con cemento	4.54 MPa
<i>Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study</i>	Arslan, et al., 2017	Escoria de alto horno con cemento	7.80 MPa

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos por estas investigaciones, especialmente aquellas que utilizaron métodos de estabilización libres de concreto, con los requerimientos de resistencia a la compresión establecidos por las normas de referencia previamente detalladas todas obtuvieron una resistencia por encima del mínimo indicado por la norma neozelandesa, sin embargo, se quedaron por debajo de la resistencia mínima para muros no estructurales de la norma mexicana, Figura 2. Los resultados obtenidos por las mezclas sin cemento, no obstante, presentan valores de resistencia a la compresión cercanos a los 2.94 MPa, que pudieran alcanzarse con una mayor exploración de las proporciones en el diseño de mezcla o con otros estabilizantes regionales que pudieran incorporarse en un futuro.

Figura 2.
Comparativa de las resistencias a la compresión en investigaciones
revisadas comparados con los requerimientos de resistencia a
la compresión de las normas de referencia.



Fuente: Elaboración propia.

Discusión de resultados

La revisión de la literatura demostró un patrón similar en el desarrollo del método para sistemas tipo tapia dentro de distintas investigaciones, que usualmente siguen el siguiente patrón:

- Caracterización del suelo, usualmente mediante granulometría y Límites de Atterberg, con algunas investigaciones utilizando normas regionales para la ejecución del proceso, *Soil property criteria for rammed earth stabilization* (Burroughs, 2010), u optando por incluir o excluir alguna otra característica que resulta de interés para el investigador o por la falta de equipo especializado, en *Rammed earth, as a sustainable and structurally safe green building: a housing solution in the era of global warming and climate change* (Khadka, 2019) por ejemplo, incluyen una prueba de campo para la determinación del contenido de agua de la mezcla.
- Diseño de mezclas, siendo usualmente una de las partes más propositivas de las investigaciones, se enfocan casi exclusivamente en la estabilización de la mezcla y la mayoría de las veces se enfocan en la inclusión de materiales regionales con este fin, como se puede ver apreciar en *Tierra vertida compactada, estabilizada con cal y puzolanas* (Baca y López, 2014) y *Uso de biopolímeros en la prefabricación de muros de tapia* (Barrera, 2022).
- Pruebas de resistencia a la compresión, si bien se identificaron investigaciones que consideran la aplicación de pruebas adicionales o alternativas, un caso es *Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study* (Arslan, et al., 2010) donde se realizaron pruebas de carga cíclica para determinar la resistencia a la fatiga del material, el consenso general coincide en aplicar ensayos a la compresión como los más relevantes para determinar la aplicación exitosa de la mezcla en el sistema constructivo. Asimismo, en países donde se contaba con una norma específica para tapia, se optó por referirse a normas internacionales, repitiéndose las neozelandesas en *Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls* (Jayasinghe y Kamaladasa, 2006) y *Rammed earth, as a sustainable and structurally safe green building: a housing solution in the era of global warming and climate change* (Khadka, 2019).

En este sentido, la metodología presentada en el presente artículo coincide con lo observado en otras investigaciones, recopilando normativas internacionales para la caracterización del suelo con que se pretenda edificar y el ensayo de las propiedades mecánicas a compresión resultantes

de un diseño de mezclas aplicado en probetas, así como de parámetros identificados en la literatura para la aplicación exitosa de la mezcla como parte del sistema de muros de tierra compactada. Así pues, se sintetizan los hallazgos del presente documento en la siguiente Tabla:

Tabla 4.

Síntesis de las normas y criterios hallados por la investigación para el desarrollo de tapias en México.

CARACTERIZACIÓN				
Característica	Norma	Unidad	Rango óptimo	Fuente
Granulometría	ASTM D2487-17 ASTM C136-01	%	10-40% de agregados finos 35-65% de agregados gruesos	Arslan, et al. 2017
Límites de atterberg	ASTM D2487-17 ASTM D4318-17	%	Índice de plasticidad menor al 15%	Burroughs, 2010
DISEÑO DE MEZCLA				
Contenido de agua	-	%	Entre el 9 y el 11.5% con respecto al peso de los componentes secos de la mezcla	Jayasinghe y Kamaladasa, 2008
ENSAYO A LA COMPRESIÓN				
Resistencia a la compresión	NMX-C-508-ONNCCE-2015	MPA Ó kg/cm ²	Muros no estructurales: 2.94 mpa (30 kg/cm ²)	ONNCCE, 2015
	NZS 4297, 4298 Y 4299 2024		Muros estructurales: 5.88 mpa (60 kg/cm ²)	Gobierno de Nueva Zelanda, 2024

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El análisis desarrollado confirma que los muros de tierra compactada constituyen una alternativa con gran potencial para diversificar los sistemas constructivos en México y reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción. A partir de la revisión de normativas internacionales y literatura especializada, se establecieron parámetros de granulometría, Límites de Atterberg, contenido de agua y resistencia a compresión que pueden servir como marco de referencia para orientar el diseño de mezclas y la futura aplicación de este sistema en el contexto nacional.

No obstante, es importante subrayar que el alcance de esta investigación se restringe al ámbito teórico-normativo, por lo que sus resultados deben entenderse como una propuesta preliminar. La validación experimental mediante la elaboración de mezclas y la realización de pruebas de laboratorio será indispensable para corroborar la pertinencia de los parámetros propuestos y ajustar la metodología a las particularidades de los suelos y condiciones constructivas locales.

En este sentido, el presente trabajo constituye un primer paso hacia la sistematización del uso de muros de tierra compactada en México, ofreciendo un marco inicial sobre el cual futuras investigaciones podrán profundizar en la experimentación y en el desarrollo de lineamientos técnicos que impulsen la adopción de esta técnica como una alternativa constructiva sostenible y viable.

Referencias

- Arslan, M. E., Emiroğlu, M., & Yalama, A. (2017). "Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study". *Construction and Building Materials*, 133, 433-442.
- ASTM International. (2016). ASTM E2392/E2392M-10(2016) "Standard guide for design of earthen wall building systems". *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/E2392_E2392M-10R16
- ASTM International. (2017). "ASTM D2487-17 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)". *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International. (2017). "ASTM D4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils". *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D4318-17>

- ASTM International. (2014). “ASTM C136/C136M-14 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates”. *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/Co136_Co136M-14
- Baca, L. F. G., & López, F. J. S. (2014). « Estabilización de suelos con cal y puzolanas ». *Construcción con tierra*, 15-24.
- Barrera, J. E. C. (2022). *Uso de biopolímeros en la prefabricación de muros de tapia*. Quaderns d’estructures: Dijous a l’ACE, (75), 29-36.
- Burroughs, S. (2008). “Soil property criteria for rammed earth stabilization”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264-273.
- Burroughs, S. (2010). “Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed earth wall construction”. *Journal of green building*, 5(1), 101-114.
- Ciancio, D., & Gibbings, J. (2012). “Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples”. *Construction and Building Materials*, 28(1), 294-304.
- Cid, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2011). “Las normativas de construcción con tierra en el mundo”. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159-169.
- Gobierno de Nueva Zelanda. (1998). NZS 4297 (1998): Engineering design of earth buildings [Building Code Compliance Documents B1(VM1), B2 (AS1)]. Gobierno de Nueva Zelanda. Recuperado del 01 de mayo de 2024, de http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4297-1998-Engineering_Design_of_Earth_Buildings.pdf
- Gobierno de Nueva Zelanda. (1998). NZS 4298 (1998): Materials and workmanship for earth buildings [Building Code Compliance Document E2 (AS2)]. Gobierno de Nueva Zelanda. Recuperado el 01 de mayo de 2024, de <https://es.scribd.com/document/414265271/NZS-4298-Materiales-y-Mano-de-Obra-Para-Construcciones-de-Tierra>
- Honne Basanna, N., Hirebelaguly Shivaprakash, S., Bhimahalli, A., Parameshwarappa, P. K., & Gaudin, J. (2020). “Role of stabilizers and gradation of soil in rammed earth construction”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020072.
- Jayasinghe, C., & Kamaladasa, N. (2007). “Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls”. *Construction and Building Materials*, 21(11), 1971-1976.
- Khadka, B. (2020). “Rammed earth, as a sustainable and structurally safe green building: a housing solution in the era of global warming and climate change”. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 119-136.
- Losini, A. E., Grillet, A. C., Woloszyn, M., Lavrik, L., Moletti, C., Dotelli, G., & Caruso, M. (2022). “Mechanical and microstructural characterization of rammed earth stabilized with five biopolymers”. *Materials*, 15(9), 3136.

- Morel, J. C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., & Bui, Q. B. (2021). *Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20200182.
- Naciones Unidas. (2023). Plan de las Naciones Unidas promete enormes reducciones de emisiones en el sector de la construcción, el más contaminante y difícil de... *Naciones Unidas*. Recuperado del 01 de mayo de 2024 de [https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/plan-de-las-naciones-unidas-promete-enormes-reducciones#:~:text=El%20objetivo%20de%20emisiones%20netas,de%20la%20industria"%2C%20añadió](https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/plan-de-las-naciones-unidas-promete-enormes-reducciones#:~:text=El%20objetivo%20de%20emisiones%20netas,de%20la%20industria)
- Thompson, D., Augarde, C., y Osorio, J. P. (2022). *A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones*. *Journal of Building Engineering*, 54, 104666.
- United Nations Environment Programme (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- Yorio, G., Navarrete, A., Bonilla, M., Aguirre, L., Manríquez, A., Sosa, A., Delgado, K., Hernández, F., y Rodríguez, G. (2023). *Taxonomía Sostenible de México*. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Recuperado del 01 de septiembre de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/809773/Taxonom_a_Sostenible_de_M_xico_.pdf

Diseño de bloques de tierras comprimidas controlando el efecto de la presión de la elaboración para desestimar el uso de cal y cemento en la mezcla

Cesar Armando Guillén Guillén*
Alberto Muciño Vélez**

Introducción

Se identifica a los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) como un recurso para la construcción de bajo costo (Asamoha-Boadu y Afukaar, 2001; Pacheco-Torgal, 2012; Minke, 2006; Khatib, 2009) que mediante la estabilización mecánica del suelo se obtienen resistencias a la compresión axial equiparables a bloques de mampostería estandarizados (Boldizsár y Gergely, 2020; Zami & Lee, 2010; Morel y Pkka, 2002; Morel, *et al.*, 2007; Lima, *et al.*, 2012; Bowen, 2017; Grunert, 2007; Allen, 2012; Jimenez-Delgado y Guerrero, 2007). No obstante, la tierra cruda como materia prima del BTC, no es un recurso estandarizado para su uso en construcción, porque su composición química y propiedades físicas son variables por región, por lo cual, también las estrategias de su aplicación útil (Lourenco, *et al.*, 2010). Por tal motivo, los sistemas de construcción con tierra deben ser normalizados por región para su uso en construcción y existen diferentes estándares a nivel internacional (ASTM, 2009; ASTM, 1989; UNCHS, 1986;

* Universidad Nacional Autónoma de México. cguillen@unam.mx

** Universidad Nacional Autónoma de México. amucino@fa.unam.mx

AFNOR, 2001; NMAC, 2009; UNE, 2008; ONNCCE, 2015; ICONTEC, 2004; BIS, 1982; SNZ, 1998; KEBS, 1993; INNORPI, 1998; ARSO, 1996; MLHUD, 2006).

Las normas que regulan el uso de BTC en México especifican la incorporación de porcentajes de cemento Portland o cal en la mezcla de tierra, según las características del suelo, para mejorar la resistencia a compresión y la durabilidad de la pieza (ONNCCE, 2015; Van Damme y Houben, 2017; Millogo y Morel, 2012).

Pero, el cemento interfiere en el proceso de reutilización de la tierra, incrementa la energía incorporada del sistema (Hafliger, *et al.*, 2017; Arri-goni, *et al.*, 2017; Keefe, 2005), y además, afecta el comportamiento térmico de la edificación (Mansour, *et al.*, 2016; Touré, *et al.*, 2017; Meukam, *et al.*, 2004). Lo cual resulta inadecuado para zonas desérticas y con clima cálido.

Por ello, se opta por lograr el control de la presión de compactación nominal de los BTC para obtener una resistencia a la compresión axial que desestime la estabilización con cal o cemento. La presión de compactación nominal influye directamente en la resistencia mecánica del BTC, ya que, al aumentar la presión de compactación, se incrementa la resistencia a compresión (Miccoli, *et al.*, 2014; Moss, *et al.*, 2010). Una mayor presión permite un mejor acomodo de las partículas y distribución de esfuerzos (Houben y Guillaud, 1994; Aubert, *et al.*, 2013; Morel, *et al.*, 2007; Piattoni, *et al.*, 2007), y el aumento de la densidad del bloque y reducción de poros, permitiendo de esta manera disminuir la absorción de agua y mejorar la durabilidad de la pieza (AFNOR, 2001; NF P 94-093, 1999; Houben y Guillaud, 1994).

Los diversos tipos de prensas para elaborar BTC, ejercen diferentes presiones de compactación nominal, dependiendo del fabricante y, por lo tanto, la capacidad mecánica de las piezas de BTC es variable. En la Tabla 1 se identifican diferentes tipos de prensas para elaborar BTC, donde los fabricantes especifican la presión de compactación nominal que actúa sobre la pieza y la máxima fuerza de compactación nominal. Mukerji y CRATerre (1998) discuten que la presión teórica no considera las pérdidas de presión al prensar a los BTC, que se reconoce, puede llegar a ser el 50% del valor teórico, y mencionan que existe una fatiga en el material por exceder su capacidad de compresión, por lo tanto, la fuerza de compactación de las piezas debe ser evaluada.

Tabla 1.

Comparación de prensas para fabricar bloques de tierra comprimida.

Tipo de prensa	Fabricante	Presión de compactación nominal			Máxima fuerza de compactación nominal
		N/mm ²	psi	Kg/cm ²	Ton
Unidad de producción móvil block 80 Tm	GEOBETON ONE. FRANCIA	20	2900	1.961	80
Kit 15/30 megabrick	<i>Les Ateliers du Progres</i>	7.7	1100	0.755	31.4
Planta de ladrillos de suelo CLU 3000	Intrex GmbH. Suiza	5	715	0.490	15
Prensa de bloques BREPAK Multibloc	Multiblock Limited. Inglaterra	10	1450	0.980	44
TEK-Block Press	Ghana	1.05-2.1	150-300	0.103-0.206	6-10
Vs CINVA ram	Sohanpal Metal Works Ltd. Tanzania	1.9	280	0.186	8
Prensa manual Terstaram	APPRO-TECHNO	3.6	520	0.353	15
Prensa semiautomática accionada por motor	--	3.6	520	0.353	15
Prensa hidráulica DSH	<i>La Mecanique Regionale</i>	3.3	475	0.323	15
Prensa manual Ceraman	CERATEC	2.1	305	0.206	10
Prensa de ladrillos automática cerámica	-----	6.3	910	0.61	30
Prensa mecánica Pact 500	ALTECH-Societe Alpine	4-8	580-1160	0.392-0.784	30-40

Dynaterre 01. Unidad de producción móvil de 4 n	Ets RAFFIN	1	145	0.098	35
Ellson blockmaster	Kathiawar Metal &	6	853	0.588	28
Astram máquina bloque de suelos	Industrias Aéreas	1.8	264	0.176	8
Tara balram	Tara	2	290	0.196	10
Prensa de bloque de levas IIT Madras	Laboratorio de Tecnología de la Construcción	2.5	365	0.245	15
CINVA-ram	METALIBEC S. A.	4.4	630	0.431	18
CETA-ram	CETA	2	290	0.196	10
CTA triple-prensa de bloque	Universidad Católica	1.4	200	0.137	11.6
Prensa Latina de CRATerre América	CRATerre AMERICA LATINA	2	290	0.196	16
UNATA 1003 y 1004	CV de UNATA	2.4	348	0.235	10
MADRO DC Press	M. Klein- Empresa MARO	2.5	360	0.245	11.5
GEO 50	ALTECH- <i>Societe Alpine</i>	2	290	0.196	8
DSM	<i>La Mecanique Regionale</i>	2.8	405	0.274	12

Fuente: Elaborado con datos de Mukerji y CRATerre (1988).

Se han reportado investigaciones en BTC que evaluaron diferentes presiones de compactación (Egenti y Khatib, 2016; Galíndez, 2009; González-López, *et al.*, 2018; Masj. y Kirschbaum, 2011; Mesbah *et al.*, 1999) (ver la Tabla 2), y se observa que existen variaciones en el desempeño mecánico al utilizar diferentes presiones en la elaboración de las piezas. Por lo que el objetivo en el presente trabajo es mejorar las características

de resistencia de piezas escaladas de BTC, evitando la utilización del cemento por los impactos que este genera (Glavind, 2009), mediante la evaluación de diferentes presiones de elaboración en los bloques para determinar la presión de compactación óptima.

Tabla 2.

Diferentes presiones de elaboración de BTC.

Presión de elaboración Kg/cm ²	f' c MPa	Fuente
35.69(3.5 N/mm ²)	4.46	(Egenti y Khatib, 2016)
25.49 (2.5 N/mm ²)	3.32	
1.7 (17.33 N/mm ²)	2.93	
8	4.40	(Galíndez, 2009)
0.6245 (0.49 kn)	2.00 - 0.86	(González-López, et al., 2018)
1.249 (0.98 kn)	5.00 -7.00	
2.49825 (1.96 kn)	11.84	
5	3.28 - 7.54	(Masj y Kirschbaum, 2011)
10	3.24 - 8.51	

Fuente: Elaboración propia

Metodología

Selección de BTC de referencia

Una pieza de BTC se sometió a una evaluación a compresión axial y se obtuvo una resistencia de 5.8 MPa (Quiroa, 2017). El BTC provenía de un lote elaborado con una prensa mecánica Cinva-Ram (con presión de elaboración desconocida) con tierra de un banco conocido, estabilizada con un 10% de cal, 5% de cemento. De ese lote se seleccionó un bloque de manera aleatoria y se cortaron piezas cúbicas de 50mm para obtener probetas de referencia.

Características de la muestra de suelo

Se evaluó el mismo suelo de las probetas testigo, que fue empleado para realizar el BTC de referencia, mediante los Límites de Atterberg (ASTM, 2005), obteniendo características para límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice de plasticidad (IP). Se describió el material según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM, 1993); posteriormente se realizó el análisis granulométrico según la norma UNE41410, identificando límites máximos y mínimos (UNE, 2008; ASTM-D75) y el proceso de secado y homogenización se realizó según lo indicado en la norma ASTM C702.

Elaboración de probetas con diferente presión

Para configurar las probetas de tierra comprimida se definió utilizar moldes en forma de cubo de 50 mm, elaborados de PTR de 2"x2" calibre 10, en el cual se vació la mezcla y mediante una prensa hidráulica con capacidad de 20 ton, se ejercieron presiones de 125, 175, 205, y 325 kg para elaborar las diferentes series de probetas. Para el ensayo mecánico se empleó la máquina de prueba a compresión INSTROM modelo 400RD-EI-H2, capacidad 200 ton, siguiendo las indicaciones de la NMX-C-508. La estabilización fue mecánica mediante la variación de presión, de las cuales se identificó la presión con mejor desempeño mecánico. Se realizaron cinco series de cada tipo de probeta en igualdad de circunstancias, empleando como única variable la presión de compactación. En la Tabla 3 se muestran las claves de las series empleadas.

Tabla 3.

Referencias de probetas estabilizadas del mismo banco.

Clave de serie	Secado	Nº de probetas	Presión de compactación nominal
BTC-T5	3 días	5	125 kg
BTC-T7	3 días	5	175 kg
BTC-T10	3 días	5	205 kg
BTC-T13	3 días	5	325 kg

Fuente: Elaboración propia

Probetas con presión ideal y estabilización química

Una vez definida la presión de compactación ideal se realizan diferentes diseños de mezcla añadiendo cal en 5%, 10% y 15%, las series se elaboraron con la misma presión de compactación y se ensayaron a los tres días de elaboración y una serie de probetas con 10% de cal a los 28 días. La serie de probetas testigo obtenidas del BTC de referencia con 10% cal y 5 % cemento, tenían más de 90 días de elaboradas al ensayarse. Se realizó una serie de probetas empleando la misma proporción que la pieza de referencia de 10% cal y 5% cemento, con la diferencia de que la serie fue ensayada a los tres días y con presión de 175 kg. En la Tabla 4 se resumen el número de series, clave de referencia y número de probetas.

Tabla 4.

Referencias de probetas estabilizadas del mismo banco.

Clave	Secado	N° de probetas	Diseño
BTC-CAL5	3 días	5	Cal 5 %
BTC-CAL10	3 días	5	Cal 10 %
BTC-CAL15	3 días	5	Cal 15%
BTC-CAL10C5	3 días	5	Cal 10 % Cemento 5%
BTC-CAL28	28 días	5	Cal 10 %
BTC-T	90 días	5	Cal 10 % Cemento 5 %

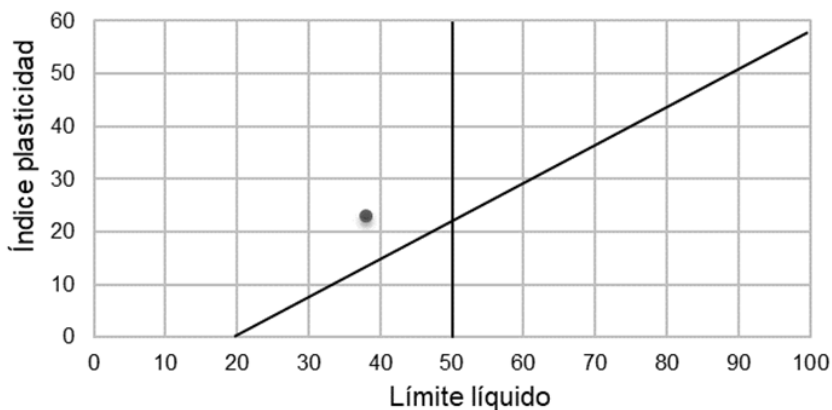
Fuente: Elaboración propia

Resultados

Índices de plasticidad y clasificación de la muestra de suelo

- Límite líquido (LL) 38%
- Límite plástico (LP)15%
- Índice de plasticidad (IP) 23%
- Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio)
- Arena Arcillosa SC.

Gráfica 1.
Carta de plasticidad.



Fuente: Elaboración propia

El tamaño de partícula del suelo utilizado cumple con los límites establecidos por la UNE 41410. Los porcentajes retenidos en cada malla se pueden apreciar en la Tabla 5. La curva de distribución granulométrica generada con los datos de la tabla 5 se encuentra entre los límites inferior y superior, identificando una tendencia hacia el incremento de finos al final de la curva. (26%). El suelo contiene partículas gruesas y finos dentro de los parámetros establecidos. En la Gráfica 2 se observa la curva dentro del rango.

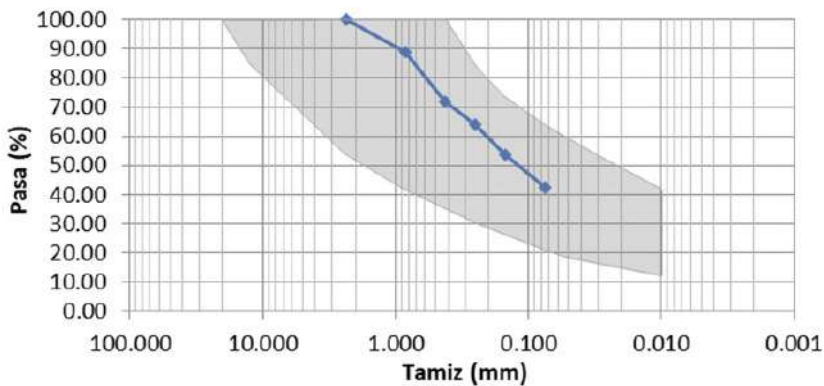
Tabla 5.
Análisis granulométrico.

Tamaño Tamiz N.	Abertura (mm)	Peso retenido Acumulado (gr)	% Retenido Acumulado	%Que pasa Acumulado
8	2.360	0	0	100
20	0.850	33.5	11.17	88.83
40	0.425	50.5	16.83	72.00
60	0.250	24.5	8.17	63.83

100	0.150	30.8	10.27	53.57
200	0.075	33.7	11.23	42.33
325	0.045	48.3	16.10	26.23
Fondo		78.7	26.23	0.00
	Total	300	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2.
Análisis de granulometría.

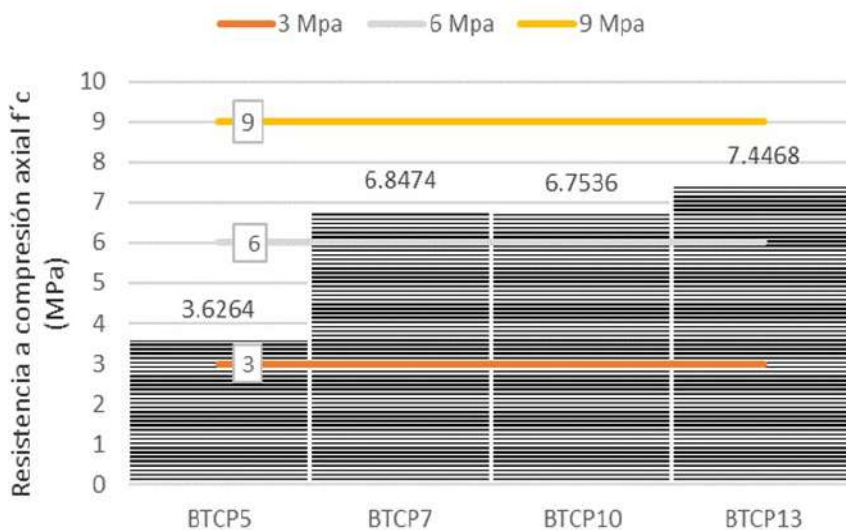


Fuente: Elaboración propia.

La serie de probetas con mejor desempeño a compresión axial son las elaboradas con 325 kg obteniendo 7.4468 MPa mientras que las series de presión de 125 kg reportaron 3.6264 MPa. Las series con presiones de 175 y 250 kg tienen un comportamiento similar en resistencia. Ninguna de las series alcanza los 9 MPa de resistencia a la compresión. El Gráfico 3 representa los resultados promedio de las series de BTC a compresión y identificando los rangos de cumplimiento de la norma según el uso de la pieza en 3MPa para muro divisorio, 6MPa para muro de carga y 9MPa para uso estructural. La Tabla 6 contiene el análisis estadístico de los resultados.

Gráfico 3.

Resistencias de BTC con presión variable de elaboración.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.

Indicadores de BTC a diferentes presiones.

Series	BTCP5	BTCP7	BTCP10	BTCP13
	$f'c$ MPa	$f'c$ MPa	$f'c$ MPa	$f'c$ MPa
N° de muestras	5	5	5	5
Promedio	3.626	6.8474	6.7536	7.4468
Desviación	0.35921	0.63576	1.105893	0.517732
Coefficiente de variación	0.0990	0.09284	0.163748	0.069524

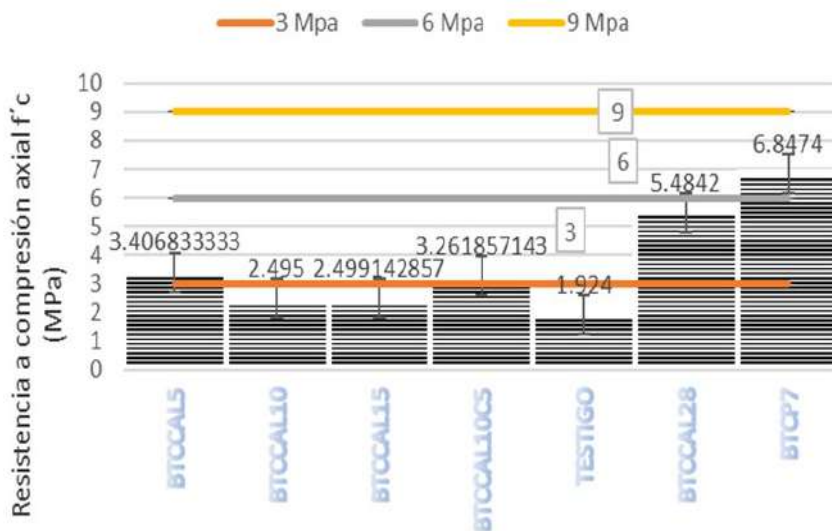
Fuente: Elaboración propia

Se determinó utilizar la presión de 175 kg para elaborar las series de BTC que se estabilizaron con cal en diferentes porcentajes. Se compararon resistencias obtenidas de BTC con lo establecido por la normatividad para resistencias a compresión de 3, 6 y 9 MPa además de la evaluación de las piezas testigo extraídas de un BTC representativo para la zona. De las series con diferentes porcentajes de cal, la que promedió mejor resistencia fue en la que se empleó el 10 % y que se ensayó a los 28 días de fabricada, con 5.4842 MPa. Las probetas elaboradas también con 10 % de cal, pero ensayadas a los 7 días presentaron una resistencia de 2.495 MPa.

En el caso de la probeta con cal 10% y con 5% de cemento, se obtuvo 3.2619 MPa a los 3 días de fabricadas, en contraste con las probetas testigo, que promediaron 1.924 MPa con 10% cal y 5% cemento ensayadas a más de 90 días desde su conformación. Las proporciones de BTC estabilizadas con cal al 5% tiene mejor comportamiento mecánico que una estabilización con 10% de cal. Los resultados de los ensayos a compresión descritos se muestran en la Gráfica 4 y Tabla 7.

Gráfica 4.

Resistencia a compresión de BTC con diferentes mezclas.



Fuente: Elaboración propia.

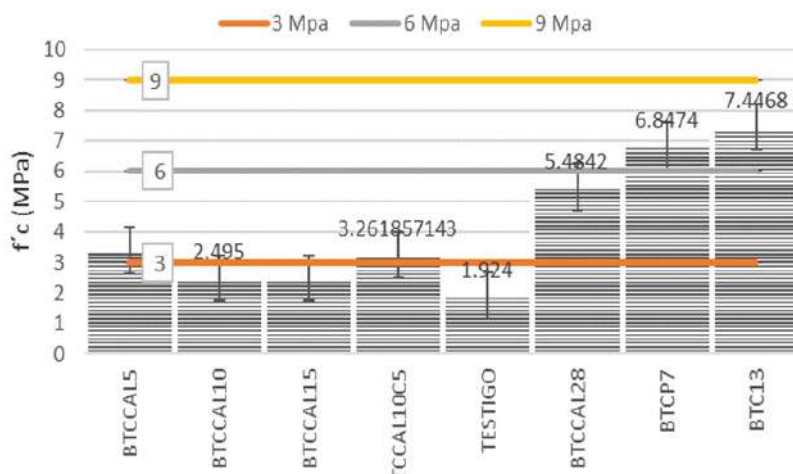
Tabla 7.
Indicadores BTC con diferentes mezclas.

series	BTCCAL5		BTCCAL10		BTCCAL15		BTCCAL10C5		BTCT	
	f' c MPa	Peso gr	f' c MPa	Peso gr	f' c MPa	Peso Gr	f' c MPs	Peso gr	f' c MPa	Peso Gr
N° de muestras	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7
Promedio	3.406	169.54	2.49	173.43	2.4991	163.628	3.26185	167.857	1.6971	266.68
Desviación	0.4524	3.5562	0.4587	9.6219	0.452	3.55621	0.45878	9.6219	0.479	3.2230
Coefficiente de variación	0.132	0.021	0.1838	0.0554	0.1810	0.021733	0.140650	0.05732	0.2826	0.01208

Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 5 se comparan, f' c de las series con estabilización química, con dos series sin emplear medios químicos para estabilizar y series en las que se usó distinta presión al realizarlas, la serie BTCP7 fue elaborada con una presión de 175 kg, y la serie BTC13, fue elaborada con una presión de 325 kg. El mejor rendimiento de las piezas a la compresión axial fue con una presión de elaboración de 175 kg. No se alcanzó resistencia de 9 MPa que establece la norma mexicana para uso estructural de bloques en ninguna serie.

Gráfica 5.
Resistencia a compresión de BTC.



Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La resistencia a la compresión de los BTC resulta variable por las diferentes presiones de elaboración y medios de estabilización analizados en esta investigación, lo cual significa obtener diferencias de calidad en las piezas. Para mejorar la calidad del BTC se debe conocer la presión de compactación. No se descarta el uso de la estabilización química, ya que existen variables que afectan a la tierra que mediante cal o cemento pueden ser disminuidas y para alcanzar los rangos normativos de 9 MPa para uso estructural de bloques. Pero, mediante un análisis del suelo, es posible elaborar BTC con resistencia adecuada, controlando la presión de elaboración de las piezas y de esta manera disminuir el uso de cal o cemento en la mezcla.

El efecto de la cal en un 5% en las mezclas de tierra de la región, incrementa las propiedades mecánicas del BTC. Sin embargo, según los datos obtenidos, al emplear 10% de cal y 5% de cemento no se logra un incremento en la resistencia mecánica del BTC. Se logran mejores desempeños mecánicos simplemente incrementando la presión de elaboración de la mezcla en 175 kg. Emplear mayor presión significa conseguir mayor resistencia a la compresión y mayor homogeneidad de las piezas, pero una mayor presión tampoco garantiza un desempeño óptimo. Entre las presiones empleadas 125, 175, 250, 325 kg la de 175 kg de presión de elaboración fue la mejor evaluada para resistencias óptimas, aunque una presión de 325 kg resultó mejor evaluada la diferencia es mínima, pero requiere mayor energía.

Conclusiones

Las presiones de compactación de 175 a 250 kg pueden ser suficientes para lograr 6 MPa de resistencia a la compresión y ser utilizados como muros de carga. Presiones de compactación de 125, 175, 250, y 325 kg, determinaron que al incrementar la presión mejora la resistencia a compresión axial.

Referencias

- Allen, G. T., (2012). *Strength Properties of Stabilized compressed earth blocks with varying soil compositions*. Boulder: University of Colorado.
- Arrigoni, A., Beckett, C., Ciancio, D. & Dotelli, G., (2017). "Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth". *Construction and Building Materials*, pp. 128-136. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066
- ARSO, (1996). Conjunto de Normas Africanas. Compressed earth blocks. ARSO 670-ARS 683. Nairobi: Kenya: African Regional Standard ARSO.
- Asamoah-Boadu, N. y Afukaar, F. K., (2001). "Application of earth building materials for low income housing in the tropics". *Journal of Applied Science and Technology*, pp. 40-45. DOI:10.4314/jast.v6i1.17384
- ASTM C1314, (2009). "Standard Test methods for compressive strength of masonry prisms". *West Conshohocken PA: ASTM International*. <https://www.astm.org/Standards/C1314.htm>
- ASTM C136, (2005). "Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos". *West Conshohocken, PA: ASTM*. <https://www.astm.org/Standards/C136.htm>
- ASTM C702-98, (2003). "Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba". *West Conshohocken, PA: ASTM*. <https://www.astm.org/Standards/C702-98.htm>
- ASTM D559, (1989). "Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures". *West Conshohocken, PA: ASTM International*. <https://www.astm.org/Standards/D559.htm>
- ASTM D75, (2003). "Práctica normativa para el muestreo de agregados". *West Conshohocken, PA: ASTM*. <https://www.astm.org/Standards/D75.htm>
- ASTM D 2487, (1993). "Práctica para la Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)". *West Conshohocken, PA: ASTM*. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- ASTM Estándar D4318, (2005). "Limite Líquido, Limite Plástico y el índice de plasticidad de los suelos". *West Conshohocken, PA: ASTM*. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C. y Maillard, P., (2013). "An earth block with a compressive strength higher than 45MPa". *Construction and Building Materials*, Volume 47, pp. 366-369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068
- BIS, (1982). *Specification for soil-based blocks used in general building construction*. IS 1725. India: Bureau of Indian Standards (BIS).
- Boldizsár, M. y Gergely, D., (2020). "Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Re-view. Geotech Geol Eng", Volume 38, pp. 2403-2425. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6>

- Bowen, T., (2017). *A Best Practice Manual for Using Compressed Earth Blocks in Sustainable Home Construction in Indian Country*. Boulder: University of Colorado, Boulder.
- Egenti, C. y Khatib, J. M., (2016). "Sustainability of compressed earth as a construction material". In: *Sustainability of Construction Materials*. Amsterdam: Woodhead Publishing, pp. 309-341. ISBN: 9780081003916
- F. Pacheco-Torgal, S. J., (2012). *Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction*. *Construction and Buildings Materials*, pp. 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- G., Minke., (2006). *Building with earth, design, and technology of a sustainable architecture*. Basel-Berlin-Boston: Birkhäuser-Publishers of Architecture.
- Galíndez, F., (2009). "Bloques de tierra comprimida sin adición de cemento". *Seguridad y Medio Ambiente*, pp. 62-73.
- Glavind, M., (2009). *Sustainability of Concrete*. In: *Sustainability of Construction Materials*. Cambridge: Woodhead Publisher, pp. 120-121.
- González-López, J. R., Juárez-Alvarado, C. J., Ayub-Francis, B. & Mendoza-Rangel, J. M., (2018). "Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks". *Construction and Building Materials*, Volume 163, pp. 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>
- Grunert, B. R., (2007). *The development of standard of care defining suitable testing of geomaterials for unstabilized compressed earth block*. Boulder: University of Colorado.
- Hafliger, I., (2017). *Buildings environmental impacts, sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials*. *J Cleaner Prod.*, pp. 805-816. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>
- Houben, H. y Guillaud, H., (1994). *Earth construction: a comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications. ISBN 185339193X
- ICONTEC, (2004). "Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones". *Métodos de Ensayo*. Condiciones de entrega. NTC 5324. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- INNORPI, (1998). *Blocs de terre comprimée ordinaires- Spécifications techniques*. NT 21.33 1996a. Tunez: Tunisian Standards.
- Jimenez-Delgado, M. C. & Guerrero, I. C., (2005). "The selection of soils for unestablished earth building: a normative review". *Construction and Building Materials*, Volume 21, pp. 237-251. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006
- KEBS, (1993). *Specifications for stabilized soil blocks*. KS 02-1070:1993. Nairobi: Kenya Bureau of Standards (KEBS).
- Keefe, L., (2005). *Earth Building*. New York: Taylor & Francis Group. ISBN 9780415323222
- Khatib, J. M., (2009). *Sustainability of construction materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A. & Neto, V. F., (2012). "Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash". *Construction and Building Materials*, pp. 829-837. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127
- Lourenco, P. B., Fernandes, F. M. & Castro, F., (2010). "Handmade Clay Bricks: Chemical, Physical and Mechanical Properties". *International Journal of Architectural Heritage*, January, 4(1), pp. 38-58. <https://doi.org/10.1080/15583050902871092>
- Mansour, B. M., Jelidi, A., Cherif, S. & Jabrallah, B., (2016). "Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)". *Construction and Building Materials*. Issue 104, pp. 44-51. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024
- Mas., J. M. y Kirschbaum, C., (2011). "Test of resistance to compression of soil-cement blocks". *Informes de la Construcción*, pp. 43-48. doi: 10.3989/ic.10.048
- Mesbah, A., Morel, J. C. & Oliver, M., (1999). "Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents". *Matériaux et Constructions*, Volume 32, pp. 687-694. DOI:10.1007/BF02481707
- Meukam, P., Jannot, Y., Noumowe, A. y Kofane, T. C., (2004). "Thermo physical characteristics of economical building materials". *Construction and Building Materials*, Volume 18, pp. 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.010>
- Miccoli, L., (2014). *Mechanical behavior of earthen materials: a comparison between earth masonry, rammed earth and cob*. Volume 61, pp. 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- Millogo, Y. & Morel, J.-C., (2012). "Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilized adobes". *Mater. Struct.*, pp. 1311-1318.
- MLHUD National Building Code, (2006). *Ministry of Lands, Housing and Urban Development (MLHUD)*. Abuja: Federal Government of Nigeria.
- Morel, J. C. y Pkila, A., (2002). "A model to measure compressive strength of compressed earth blocks". *Construction and Building Materials*, Volume 16, pp. 303-310.
- Morel, J.-C., Pkila, A. & Walker, P., (2007). "Compressive strength testing of compressed earth blocks". *Construction and Building Materials*, pp. 303-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Moss, R., (2010). *Design and Construction Manual*, Cal Poly San Luis Obispo: Civil Engineering Senior Design.
- Mukerji, K. y CRATerre, (1988). *Soil Blocks Presses*. Eschborn, Hessen: GATE.
- NF P 94-093, (1999). *Détermination des références de compactage d'un matériau - Proctor Normal et Proctor Modifié*. s.l.NF P.
- NMAC, (2009). *New Mexico Earthen Building Materials Code*. Santa Fe, New Mexico: New Mexico Earthen Buildings Materials Code.

- Norme Française AFNOR XP P13-901, (2001). Bloc de Terre comprimée pour murs et coisons. Définitions-Spécifications. Méthodés d'essais-Conditions de reception. La Plaine Saint-Denis: AFNOR.
- ONNCCE, (2015). NMX-C-508-ONNCCE-2015 Building Industry-Compressed earth blocks of lime stabilized-specifications. Definitions, specifications and testing methods. México: ONNCCE.
- ONNCCE, S. C. Norma NMX460 Industria de la Construcción, (2009). *Aislamiento Térmico-Valor R para envolventes en vivienda por zona térmica para la República Mexicana-Especificaciones y Verificación*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Piattoni, Q., Quagliarini, E. y Lenci, S., (2011). "Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of earthen bricks". *Construction and Building Materials*, Volume 25, pp. 2067-2075. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>
- Quiroa Herrera, J. A., (2017). *Análisis y evaluación de prototipo de vivienda social construida con materiales alternativos en la ciudad de Torreón Coahuila.*, Torreón, Coahuila: Universidad Autónoma de Coahuila.
- SNZ, (1998). *Engineering design of earth buildings*. NZS 4297. Wellington: Standards New Zealand (SNZ).
- Touré, P. M. y otros, (2017). "Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CEB)". *Journal of Building Engineering*, Volume 13, pp. 266-271. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.08.012>
- UNCHS Habitat, (1986). *Earth Construction Technology: Manual on Surface Protection*. Nairobi: UNCHS Habitat.
- UNE 41410, (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid: AENOR.
- Van Damme, H. y Houben, H., (2017). Earth concrete. Stabilization revisited. Cement. Concrete. Resistance. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>
- Zami, M. S. & Lee, A., (2010). "Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing-State of the art review". *Journal of Building Appraisal*, 5(3), pp. 259-271. <http://doi:10.1057/jba.2009.32>

Conclusiones y perspectivas futuras

El presente volumen expresa el estudio de los materiales para su incorporación en sistemas constructivos en las edificaciones. La Arquitectura hoy en día, busca fortalecerse mediante la ciencia e ingeniería en materiales para tener bases sólidas que le permitan tomar decisiones para proponer diseños arquitectónicos encaminados a explotar las capacidades de los materiales, tomando en cuenta sus propiedades con la finalidad de contribuir a criterios sustentables. Nuestra disciplina continúa en la búsqueda de herramientas para innovar en los sistemas constructivos, permitiendo demostrar que se puede generar investigación apoyándose de otras disciplinas, para fomentar en la formación de futuros arquitectos propuestas de edificaciones sustentadas en el desarrollo de trabajos experimentales, basados en la información obtenida con los materiales que pueden abundar en nuestro país.

A lo largo de este tiempo en el que los autores han plasmado sus investigaciones se resalta el trabajo minucioso en la investigación y pretende establecer un antecedente que permita el interés de futuros estudiantes de arquitectura. Este libro permitió la interacción de alumnos de posgrado con investigadores y cómo el trabajo mutuo establece directriz en la generación de conocimiento. Busca demostrar la importancia de seguir generando trabajos con pertinencia y atendiendo a problemas que se desarrollan en las obras arquitectónicas.

Es importante mencionar que es necesario seguir generando investigación experimental que nos permita como Arquitectos tomar mejores decisiones

y propuestas donde converjan las distintas visiones desde la multi e interdisciplina. Estos capítulos desarrollan los datos que permiten perfeccionar espacios bajo los principios de habitabilidad que, en un futuro, cuando se plantee la propuesta de diseño se tenga en consideración los materiales del lugar bajo un método capaz de obtener los criterios estructurales que formarán parte del proyecto integral. La intención es continuar generando investigación y tener más opciones a la hora de proponer un sistema constructivo, accediendo a cifras de referencia para conocer las virtudes que este tipo de materiales pueden generar en nuestro país. Finalmente, este libro busca marcar una pauta en la difusión de información para la literatura, acercando a los constructores o diseñadores de espacios, identificando las distintas problemáticas que se encuentran cuando se decide proponer y establecer aquellos elementos que pueden dotar de un espacio.

Alberto Muciño Vélez

*Centro de Investigación en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje,
Facultad de Arquitectura, UNAM.*

**Arquitectura y Ciencia de Materiales.
Una experiencia interdisciplinaria**

se terminó de editar en noviembre de 2025
en los talleres gráficos de Ediciones de la Noche
Francisco I. Madero #687, Zona Centro
44100, Guadalajara, Jalisco, México.

www.edicionesdelanoche.com



A *rquitectura y Ciencia de Materiales. Una experiencia interdisciplinaria* reúne una década de investigaciones que demuestran cómo la colaboración entre la Arquitectura y la Ciencia de Materiales abre nuevas posibilidades para comprender, optimizar y conservar los sistemas constructivos contemporáneos y tradicionales.

A través de diez capítulos agrupados en tres secciones — Fundamentos y Métodos de Caracterización; Optimización y Desarrollo de Materiales; y Materiales Tradicionales en la Arquitectura Sostenible— la obra presenta estudios rigurosos que integran técnicas avanzadas como la indentación instrumentada, la calorimetría, la simulación computacional y los ensayos ultrasónicos, junto con metodologías aplicadas al análisis del bambú, la tierra, los morteros y los sistemas constructivos vernáculos.

El libro muestra cómo el trabajo interdisciplinario permite profundizar en la comprensión microestructural y mecánica de los materiales, vincular el conocimiento científico con problemas reales del sector construcción, y aportar herramientas para enfrentar los retos actuales de la sustentabilidad, la innovación tecnológica y la conservación del patrimonio.

CUAAD

CENTRO UNIVERSITARIO DE
ARTE, ARQUITECTURA Y DISEÑO

ISBN 978-607-581-864-1



9 786075 818641