

PANELES PREFABRICADOS TERMO-ACÚSTICOS A PARTIR DE PAJA DE CEREAL Y TIERRA ESTABILIZADA

Carlos Cobreros¹; José Luis Reyes-Araiza²; Alejandro Manzano-Ramírez³

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, México, ccobreros@itesm.mx

² Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, México, araiza@uaq.edu.mx

³ CINVESTAV-Querétaro, México, amanzano@qro.cinvestav.mx

Palabras clave: compuesto arcilloso, cal, puzolanas

Resumen

Se plantea el desarrollo tecnológico de un nuevo panel termo-acústico y prefabricado a partir de la estabilización del suelo arcilloso por medio del uso de puzolanas combinadas con cal. Se parte de un estudio previo sobre la actividad puzolánica de los diferentes materiales estudiados. Se define y caracteriza el compuesto y sus diferentes dosificaciones a ensayar, teniendo en cuenta las diferentes relaciones aglomerantes/estabilizantes/arena y fibras/aglomerantes. A partir de aquí se experimenta una serie de combinaciones propuestas de compuesto arcilloso a partir de la primera caracterización de este y sus diferentes dosificaciones como para obtener unas conclusiones sobre sus características y así poder proponer una tipología de panel. Finalmente se plantea la propuesta de una tipología de panel a partir de un compuesto arcilloso estabilizado y paja de cereal como refuerzo fibroso, y se probarán sus prestaciones termo-acústicas, mecánicas y de durabilidad como para aplicarlo dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda, llegando a conclusiones sobre esta aplicación y sobre su aportación.

1. INTRODUCCIÓN

La prefabricación es una de las posibles formas de materialización del proceso de industrialización en la construcción (Salas, 2008), donde se logra un perfeccionamiento sistemático de los procesos técnicos y logísticos de fabricación (Pich-Aguilera; Battle; Casaldáliga, 2008).

Existen autores que, partiendo del análisis de los sistemas constructivos tradicionales, valoran las posibilidades técnicas y económicas de la industria contemporánea para mejorar los procesos de fabricación y puesta en obra, y abogan por una industrialización y una especialización del sector de la construcción (Pich-aguilera; Battle; Casaldáliga, 2008). Existen investigaciones a nivel internacional que concluyen sobre los aportes que estos sistemas industrializados y prefabricados tienen al reducir el costo, tiempo y mano de obra (Ahmad Bari et al., 2012), el consumo de recursos, de materia prima implicada, al mejorar la calidad de la construcción y disminuir las emisiones de CO₂ tanto en la fabricación como en la logística de su transporte, puesta en obra y vida útil (Wadel; Avellaneda; Cuchí, 2010).

La industrialización ha sido equiparada casi siempre al uso del acero, el aluminio, el hormigón y el plástico. Hay autores que plantean un cambio de paradigma respondiendo a circunstancias particulares, a lo que el entorno local ofrezca. En México no hay mucho avance en el estudio de componentes prefabricados y estándares basados en recursos locales, como los suelos arcillosos y las fibras vegetales lignocelulósicas.

La construcción contemporánea en tierra se puede englobar en tierra estabilizada y tierra sin estabilizar, prescribiéndose la tierra estabilizada como una solución adecuada para la crisis de vivienda urbana y la sostenibilidad medioambiental y siendo necesaria para cumplir con los estándares requeridos en el mercado que ciertos productos sin estabilizar no podrían pasar (Zami; Lee, 2010). Según Guillaud (2008), la tierra estabilizada implica la modificación

de las propiedades del sistema tierra-agua-aire, habiéndose identificado cerca de 130 diferentes estabilizadores, incluyendo el cemento, la cal y el bitumen (Lal, 1995).

La tierra se tiende a estabilizar para evitar las fracturas por retracción en el proceso de secado, reducir la plasticidad, mejorar la trabajabilidad, la resistencia mecánica, la resistencia a erosión, y con ello, lograr mayor durabilidad (Reddy, 2007). Aunque la paja de cereal puede servir como estabilizador y ayuda en evitar las fracturas por retracción y aportar aislamiento térmico y reducir el peso (Minke, 2001), su uso puede afectar la resistencia a compresión (Binici; Aksogan; Shah, 2005), en lo cual también influye el tamaño del elemento constructivo y el ratio de las dosificaciones. En la mayoría de los casos es necesario la combinación de estabilizadores químicos (ceniza volante, cal, cemento, entre otros) con el refuerzo de la fibra, pues mientras los primeros aportan la estabilidad del suelo, al mismo tiempo empeoran la ductilidad del compuesto, y la fibra, en este sentido ayuda a reducir la fragilidad del compuesto (Hejazi et al., 2012). La adición de materiales puzolánicos puede mejorar las propiedades de los compósitos (Toledo Filho, 2003).

Se concluye que la tierra estabilizada con cemento puede causar contaminación aérea y que se necesitan más estudios con estabilizantes no basados en el cemento portland (Zami; Lee, 2010), pudiéndose analizar la estabilización con cal, yeso y residuos puzolánicos aluminosilicatos (Pacheco-Torgal; Jalali, 2012). La combinación de los materiales puzolánicos con la cal conlleva la formación de un compuesto cementicio con similares características a las del cemento portland.

El camino de la construcción con tierra pasa por trabajar e investigar en la industrialización, prefabricación y mecanización para la optimización de procesos y la adición de materiales que aporten estabilización, durabilidad y protección frente a la humedad (Bestraten; Aksogan; Shah, 2011). Con la industrialización y prefabricación de los materiales en base a paja de cereal y tierra se pueden mejorar las características naturales del material y garantizar unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra en un entorno urbano.

El artículo expone parte de la caracterización, experimentación y desarrollo de un compuesto arcilloso estabilizado mediante el uso de puzolanas combinadas con cal y reforzado con paja de cereal, adecuado para la propuesta de un panel prefabricado con prestaciones termo-acústicas y su aplicación en vivienda.

2. METODOLOGÍA

2.1 Definición de dosificaciones del compuesto a caracterizar

a) Caracterización del compuesto

Se establece una serie de posibles puzolanas a utilizar.

Tabla1. Resumen de las puzolanas potenciales en su uso y su procedencia

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
BD	polvo de ladrillo	procedente de una planta de producción tradicional local
VA	ceniza de volcán	colectada de la última erupción, en junio del 2013, del volcán Popocatepetl en el estado de Puebla (México) y a partir de arena de volcán colectada en las faldas del mismo volcán
FA	ceniza volante	recogida como residuo de una planta carbono-eléctrica en el estado de Coahuila (México)
BSA	ceniza de paja de cebada	procedente de planta de cebada de la región de El Bajío (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema
WSA	ceniza de la paja de trigo	procedente de planta de cebada de la región de El Bajío (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema

Según Cobrerros et al. (2015) en la caracterización de diferentes puzolanas expuestas en la tabla 1, BD y FA presentan una mayor concentración de aluminio y sílice reactiva y una buena concentración de hierro. La alta concentración de Al y Si indica una mayor posibilidad de reacción con el CH y una mayor probabilidad de constituir un material cementicio. BD presenta una mayor proporción de estructura amorfa, pudiéndose identificar estructuras cristalinas como aluminosilicatos, algo que caracteriza a las puzolanas con buenas características puzolánicas.

En general, BD y FA, que en un principio muestran la mayor concentración de silicio y aluminio reactivo, tienen los mejores resultados en el desarrollo de resistencia a compresión con la mezcla puzolana-arena-cal-agua a diferentes tiempos y en condiciones reguladas, denotándose una mejor actividad puzolánica (parámetros cinéticos) a edades tempranas según el método de medición por conductividad eléctrica. Al mismo tiempo también se puede observar una mayor evolución y creación de nuevas fases cristalinas en respuesta a esta reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio (Cobrerros et al., 2015).

Por estas razones se decide realizar las primeras caracterizaciones basadas en el uso de BD y FA. Primero se hace la determinación de la durabilidad del compuesto según las primeras dosificaciones establecidas. Se hace la discriminación, según los resultados de durabilidad, y a continuación se realiza la caracterización mecánica del compuesto.

Tabla 2. Relación de los materiales componentes del compuesto arcilloso estudiado

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
L	cal hidratada	producto comercial procedente de una planta de producción regional
A	arena	producto comercial de producción regional
AV	arena volcánica	arena del volcán Popocatepetl en el estado de Puebla (México), colectada en las faldas del mismo volcán
AR	arenilla	producto comercial de producción regional
SA	suelo arcilloso	extraído de suelo de terreno de la localidad cercana a Querétaro de La Solana
PC	paja de cereal	paja de cereal de cebada recolectada en campo experimental INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya

Tabla 3. Dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización primera de durabilidad sobre los compuestos

Sigla	Dosificación de la mezcla
P01.01	suelo: (A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.02	PC:2% + suelo:98%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.03	PC:4% + suelo:96%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.01	cementante:10% (L:100%) + suelo:90%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.02	PC:2% + cementante:9% (L:100%) + suelo:89%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.03	PC:4% + cementante:8% (L:100%) + suelo:88%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P03.01	cementante:30% (L:50%+BD:50%) + suelo:70%(AR:60%+SA:40%)
P03.02	PC:2% + cementante:29% (L:50%+BD:50%) + suelo:69%(AR:60%+SA:40%)
P03.03	PC:4% + cementante:28% (L:50%+BD:50%) + suelo 68%(AR:60%+SA:40%)
P04.01	cementante:30% (L:50%+FA:50%) + suelo:70%(AR:60%+SA:40%)
P04.02	PC:2% + cementante:29% (L:50%+FA:50%) + suelo:69%(AR:60%+SA:40%)
P04.03	PC:4% + cementante:28% (L:50%+FA:50%) + suelo:68%(AR:60%+SA:40%)

b) Determinación de la durabilidad del compuesto

Sobre las dosificaciones descritas en la tabla 3, se plantea establecer marco hipotético de condiciones climáticas a las que se verá sometido el material, usando un método de envejecimiento acelerado de sometimiento a ciclos de mojado y secado (Soroushian et al., 2004).

Se realiza un ciclo de mojado durante 6 horas. Posteriormente las probetas se secan, durante 42 horas, con lo que se cumple un ciclo completo de 48 horas en ambiente exterior. Posteriormente se vuelven a sumergir en agua y se completan 24 ciclos completos de mojado-secado (Reyes, 2009). Una vez terminados los 24 ciclos completos de mojado-secado, se realiza una comparativa visual a partir de imágenes digitales y se realiza un test de resistencia a compresión.

c) Determinación de características mecánicas básicas

Resistencia a compresión: se estudia mediante la aplicación hasta rotura de una carga uniformemente repartida, según lo establecido por la norma ASTM E761 (2015):

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

donde:

Rc – resistencia a compresión (N/mm²)

Fc – carga máxima a rotura (N)

S – superficie de la base sobre la que se aplica la carga (mm²).

Los ensayos se realizan con la misma máquina que los ensayos a flexo-tracción, con probetas cilíndricas de 100 mm de alto y 50 mm de diámetro para las pruebas preliminares y de 200 mm de alto y 100 mm de diámetro para las pruebas finales. En el caso de los cilindros 100x200mm, el cabeceado se hace mediante cabeceadores metálicos normalizados de la marca TK con cavidad de 10 cm de diámetro con base de neopreno de ½ pulgada de grosor.

El ensayo para determinar la resistencia a flexo-compresión se realiza sobre el lado más pequeño de paneles de 60x300x300mm en posición vertical. El cabeceado se hace con una base de neopreno de ½ pulgada de grosor y de 6x30cm, cubriendo toda la superficie de la base, sobre la que se coloca otra lámina de neopreno de las mismas características sobre la que se coloca una placa de acero de ½ pulgada de grosor sobre el que la máquina universal hará la presión. La resistencia a carga máxima se determina según la siguiente ecuación:

$$R_{fc} = \frac{F_{fc}}{S}$$

donde:

Rfc – resistencia a flexo-compresión (N/mm²)

Ffc – carga máxima a rotura (N)

S – superficie de la base sobre la que se aplica la carga (mm²).



Figura 1. Probetas: a) cilindro para el ensayo de compresión; b) panel para el ensayo de flexo-compresión

2.2. Definición y caracterización del panel

Finalmente, se caracteriza el compuesto con formato de panel, con unas dimensiones proporcionales a las que pueda tener comercialmente y de grosor en relación a los valores obtenidos según las diferentes caracterizaciones. Se determina como una posibilidad de desarrollo comercial con dimensiones de 6 m y 1,2 m de ancho por 2,4 m de alto por 6 cm de grosor. Se caracteriza un material de 6 m de ancho x 3 m de alto x 6 cm de ancho.

a) Caracterización mecánica

Ensayo a compresión (ASTM E72-02, 2002): la muestra se evalúa como una columna que tiene un extremo plano en su parte inferior. La carga de compresión se aplica a la placa de acero que cubre el extremo superior de la muestra, se distribuye de manera uniforme a lo largo de una línea paralela a la cara interior, y a un tercio del espesor de la muestra de la antedicha cara interior. Para medir el acortamiento de la muestra se conectan cuatro compresómetros a sus caras, uno cerca de cada una de sus esquinas. Las lecturas se registran con una precisión de 0,025 mm (0,001 pulgadas). Se trabaja con dos deflectómetros, uno para cada lado de la muestra.



Figura 2. Deflectómetro para medición de deformaciones

De los datos obtenidos del ensayo, es necesario hacer una serie de cálculos para obtener resultados que se puedan interpretar y llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada. A continuación se explica la forma de obtener estos resultados.

Deformación: para cada compresómetro, se calcula la reducción en cada carga, como la diferencia entre la lectura cuando se aplica la carga y la lectura inicial. Para este ensayo, se probaron cinco paneles con medidas y pesos similares por cada dosificación. El ensayo consistió en aplicar carga axial utilizando la maquina universal hasta que estos fallaran. Se utilizó un micrómetro en cada panel para medir los desplazamientos.

Definición de esfuerzo de diseño: posteriormente se hizo un promedio del esfuerzo-deformación de los distintos paneles y se trazó la línea de tendencia. A partir de este trazo se determinó el valor de esfuerzo último y el esfuerzo de diseño.

Cálculo del módulo de elasticidad (E): se obtiene al despejar la ecuación del ACI 318-08 (2008), de la sección 8.5.1, que se muestra a continuación:

$$E = wc^{1,5} \times 0,14 \times \sqrt{f'm}$$

donde:

E – módulo de elasticidad (kgf/cm²)

wc – peso específico del panel (kg/m³)

f'm – esfuerzo de diseño (kgf/cm²)

b) Caracterización térmica

Se calcula la conductividad térmica del material por el método de la placa caliente, que es un método absoluto o primario de medición de propiedades de transmisión de calor, en régimen estacionario, a través de probetas con forma de placa plana.

El aparato es para dos probetas y consiste en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 15 mm. El sistema de medición utilizado está integrado por los siguientes accesorios: tarjeta DAQ-ACPC-1216, control de temperatura Watlow SD, bomba sumergible, contenedor de agua para enfriamiento, multímetro y amperímetro de gancho, transformador de Voltaje Staco Energy, cajón del sistema de placa caliente, termopares tipo K, computadora pc, placa caliente, termopares, sistema de adquisición de datos, Controlador de temperatura y fuente de voltaje variable. Para el registro de las temperaturas del sistema se utiliza el software DASYLab, el cual está en interfase con la tarjeta de DAQ-ACPC-1216. Para el procesamiento de los datos y la determinación de la conductividad térmica se usa el software Excel.

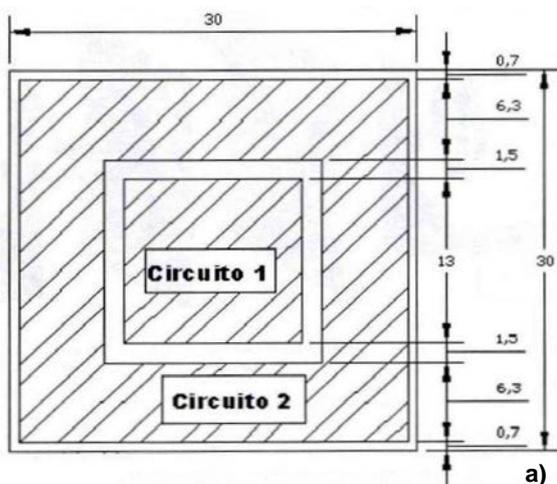


Figura 3. Ensayo de conductividad térmica: a) circuitos eléctricos del sistema de placa caliente (cotas en cm); b) termopares conectados

Procedimiento

1º) Se preparan las muestras, se colocan y se procede a la medición. Posteriormente se tiene que esperar el tiempo necesario para que la temperatura de las placas se estabilice o se alcance el estado estacionario.

2º) La conductividad se determina una vez que el equipo alcanzó el estado estacionario de transferencia de calor. Los datos necesarios para el cálculo de la conductividad térmica son la diferencia de temperatura entre ambas caras, la potencia eléctrica suministrada a la resistencia del área de medición, el área de medición y el espesor de la muestra. De acuerdo con la Ley de Fourier para la conducción de calor, una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, la velocidad de transmisión calorífica a través de una pared es:

$$q = -k \times A \times \frac{dt}{dx}$$

donde:

q – velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor (cal/s),

k – conductividad térmica del material (cal/m×s×°C),

A –área del material, perpendicular al flujo del calor (m²),

dt – diferencia de temperatura entre la cara fría y la cara caliente (°C)

dx – espesor en la dirección x (m)

De esta fórmula se despeja el coeficiente de conductividad térmica k, y se calcula en función de los parámetros ya vistos. La conductividad térmica se determina mediante la siguiente expresión:

$$k = (e \times \frac{1}{2} P) / (\Delta t \times A)$$

donde:

k – conductividad térmica del material (W/°C×m)

e – espesor de la probeta (m)

P – potencia eléctrica suministrada (watts)

Δt – diferencia de temperatura entre la cara fría y la caliente (°C).



Figura 4. Equipo de medición completo

c) Caracterización acústica

De cara a determinar su buen rendimiento y su aporte a nivel de acondicionamiento acústico, se plantea hacer diferentes estudios analíticos, a comparar entre sus resultados.

Un primer cálculo se hace determinando el valor de aislamiento frente a sonido aéreo (Ra) que, para paredes de tierra se obtiene, para $\rho' > 50 \text{ kg/m}^2$, mediante la expresión (Bestraten; Aksogan; Shah, 2007):

$$R_a = 21,65 \log_{10} \times \rho' - 2,3 \text{ (dB)}$$

donde

$$\rho' = \rho \times t,$$

ρ – densidad del muro (kg/m^3)

t – espesor del muro (m)

Se plantea otro estudio analítico a partir del estudio de la relación entre el índice de reducción acústica (R) como función de su masa por unidad de superficie m' y la frecuencia f . La correlación obtenida es (Díaz et al., 2012):

$$R = 29 \times \log(f) - 74 \text{ (dB)}$$

donde

m' – densidad del muro por unidad de superficie (kg/m^2)

f – frecuencia aplicada

3. RESULTADOS

3.1 Determinación de la durabilidad del material

Método de envejecimiento acelerado, ciclos de mojado y secado:

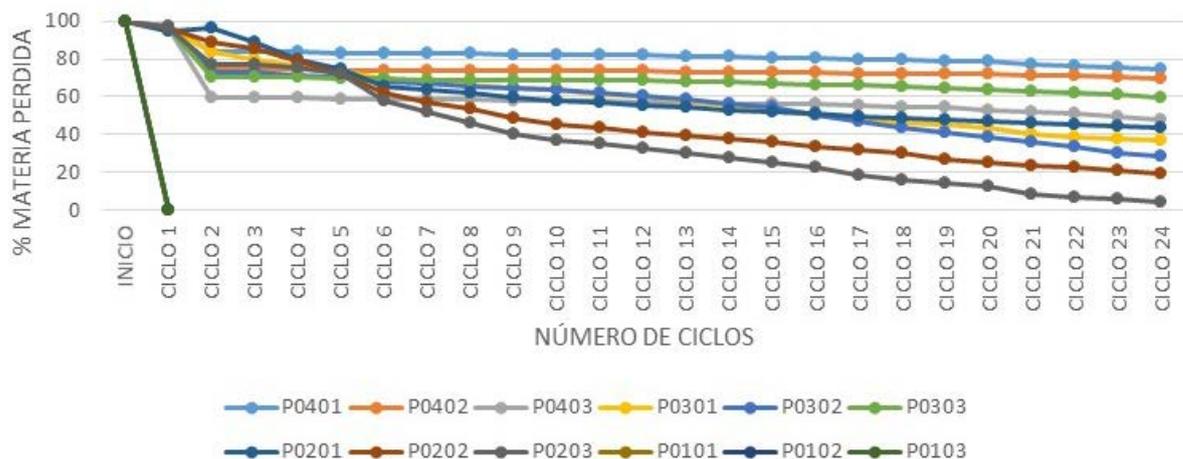


Figura 5. Prueba de durabilidad con ciclos de mojado y secado

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 deja el resultado de que las probetas P0101, P0102, P0103, aquellas que no tienen ningún estabilizante, se disgregan en el primer ciclo y se observa como las probetas P0401, P0402 y P0303 son los que tienen mejor resultado.



Figura 6. Probetas en la prueba de durabilidad mojado-secado en su quinceavo ciclo

3.2 Determinación de características mecánicas básicas del compuesto



Figura 7. Probetas cilíndricas y paneles para las pruebas para la caracterización mecánica

Para la caracterización mecánica se descartan los especímenes P01.01, P01.02, P01.03 debido a su mal resultado en la prueba de durabilidad.

En la figura 8 se observa la comparativa de la resistencia a la compresión entre las probetas cilíndricas 10x20 donde los especímenes se diferencian en trabajar la estabilización por medio del añadido de cal y puzolana, BD y FA, en el caso de P03.01, P03.02, P03.03, P04.01, P04.02, P04.03, donde sólo varía la cantidad de añadido del refuerzo fibroso, a diferencia de los especímenes P02.01, P02.02, P02.03, donde se trabaja la estabilización con un ajuste de la granulometría y sólo añadiendo la cal como elemento estabilizante sin puzolanas. Se muestran los resultados a 14 y 28 días. Se observa un mejor resultado en el caso P04.01, con parecidos resultados en el caso de P02.01 y P03.01, aunque se observa una evolución más favorable de los 14 días a los 28 de la probeta P03.01.

En la figura 9 se observa la comparativa entre la resistencia a flexo-compresión de los paneles 30x30x10 cm donde los especímenes se diferencian en su composición de manera análoga que en el caso de los cilindros 10x20 cm, donde se muestran los resultados a 14 y 28 días. También se observa un mejor resultado en el caso P04.01, con parecidos resultados en el caso de P02.01 y P03.01, se observa una evolución más favorable de los 14 días a los 28 de la probeta P03.01.

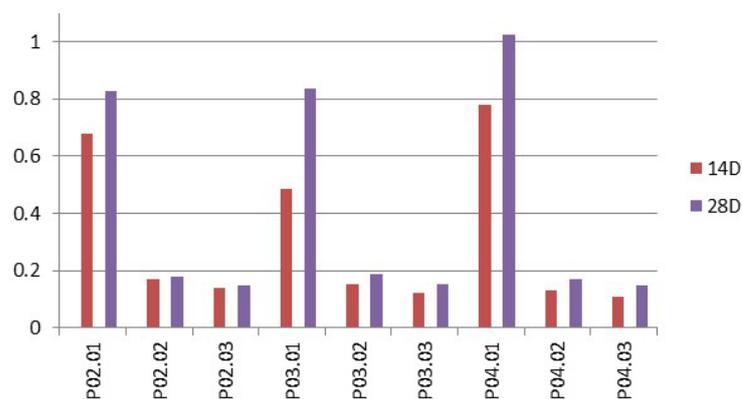


Figura 8. Resultados de pruebas preliminares de resistencia a compresión, medido en MPa

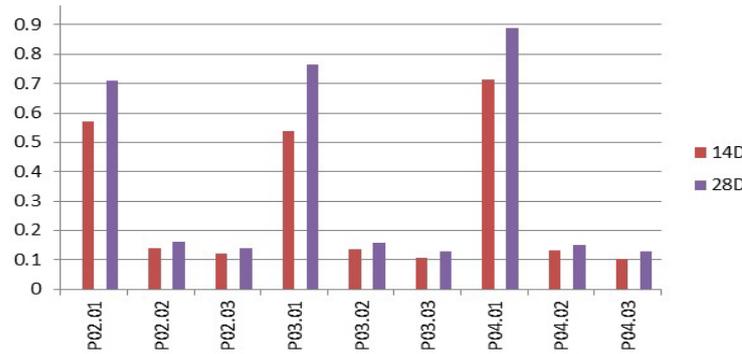


Figura 9. Resultados de pruebas preliminares de resistencia a flexo-compresión, medido en MPa

3.3 Definición y caracterización del panel

Tras los resultados de los estudios de durabilidad y mecánicas del compuesto primero se decide utilizar FA como puzolana en combinación con L al 50% en la composición del cementante. Se caracterizan diferentes especímenes según el añadido de PC.

Tabla 4. Dosificaciones planteadas para la conformación de los paneles.

Sigla	Dosificación de la mezcla
PF01.01	cementante:20% (L:50%+FA:50%) + suelo:80%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
FP01.02	PC:1% + cementante:19.5% (L:50%+FA:50%) + suelo:79.5%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.03	PC:2% + cementante:19% (L:50%+FA:50%) + suelo:79%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.04	PC:4% + cementante:18% (L:50%+FA:50%) + suelo:78%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.05	PC:8% + cementante:16% (L:50%+FA:50%) + suelo:76%(A:32%+AR:8%+SA:60%)

Los paneles PF0101 no son contabilizados en las pruebas que siguen pues no resisten el proceso de secado y fraguado sin disgregarse y agrietarse.



Figura 10. a) Panel PF0101 con fracturas y grietas por contracción/retracción; b) Paneles de la serie final PF, en proceso de secado y curado; c) Paneles PF0104 en proceso de secado y curado; d) Paneles PF0105 en proceso de secado y curado

3.5 Caracterización mecánica

De todos los ensayos a compresión realizados en los diferentes paneles, se comparan los resultados respecto al esfuerzo deformación, esfuerzo último y esfuerzo de diseño.

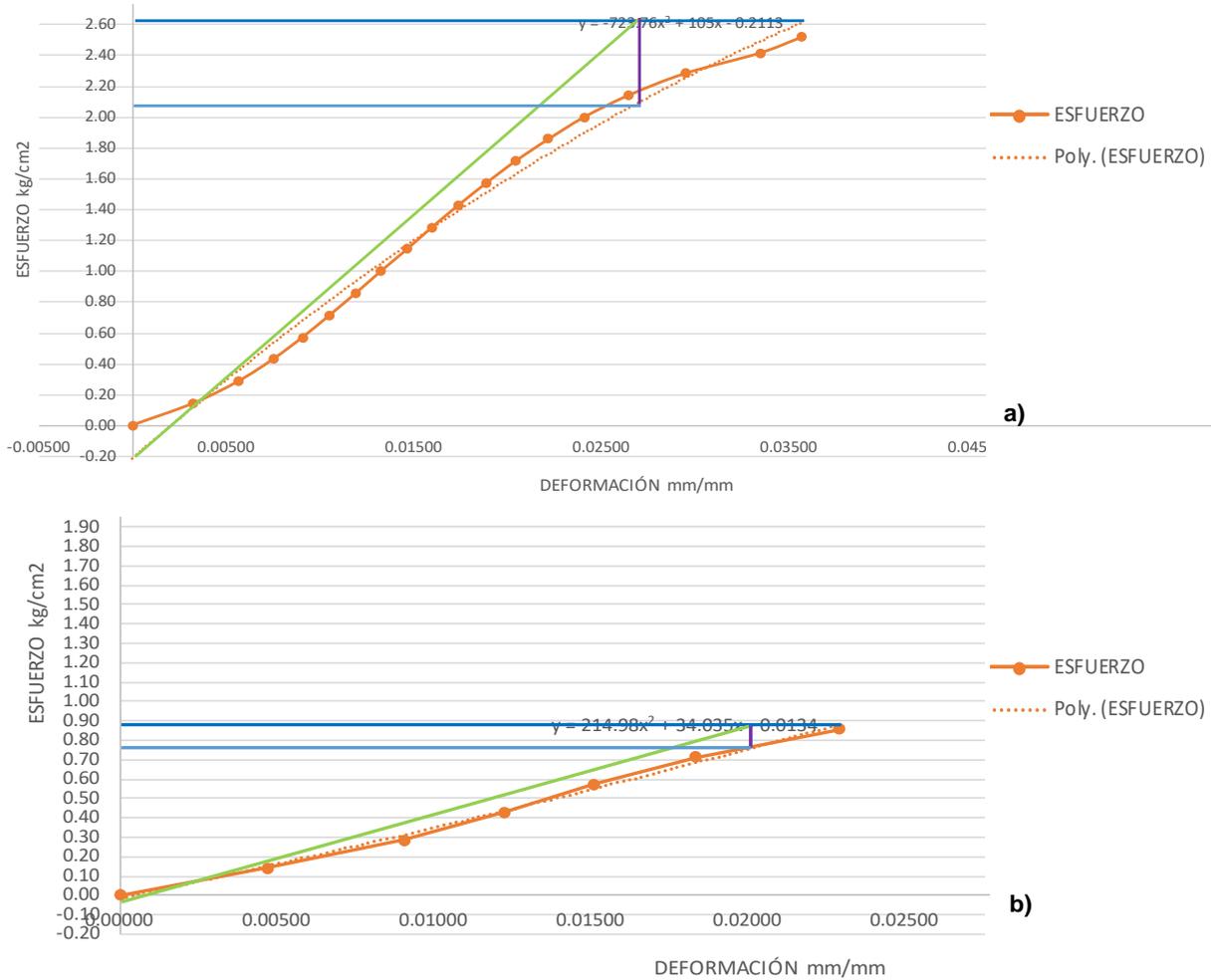


Figura 11. Relación esfuerzo de deformación último y de diseño del panel tipo: a) PF0103; b) PF0104

Al comparar los resultados en la prueba de compresión sobre los paneles con formato 30x60x6cm se ve como los paneles con menor proporción de refuerzo fibroso demuestran un mejor comportamiento en su resistencia y en su módulo elástico, teniendo el panel tipo PF0102 el mejor resultado en su valor de resistencia a compresión, teniendo en cuenta el esfuerzo límite de diseño, seguido del panel tipo PF0103 y el panel PF0103 el mejor resultado en el valor del módulo elástico.



Figura 12. Análisis de compresión comparativa: a) esfuerzo de diseño; b) módulo elástico

3.6 Caracterización térmica

En los paneles PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 de la fase final se obtiene un resultado lógico donde a medida que aumenta el contenido de paja como refuerzo fibroso, este mismo aporta aislamiento térmico y la conductividad térmica baja. El panel PF0105 por lo tanto obtiene el mejor resultado con un valor por debajo de 0,100 W/m°C, por lo que se le puede considerar que tiene carácter de material aislante, presentando el peor resultado el panel PF0101.

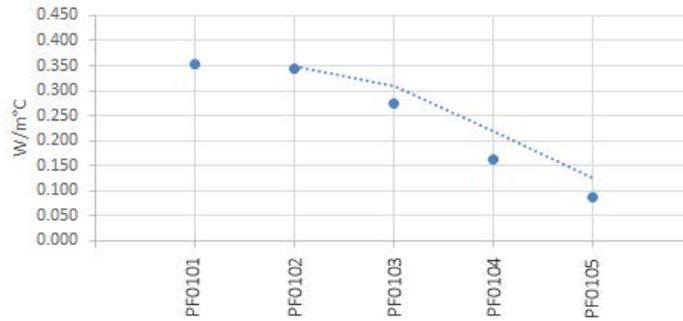
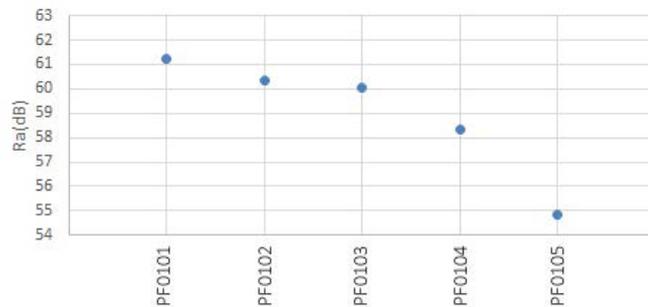


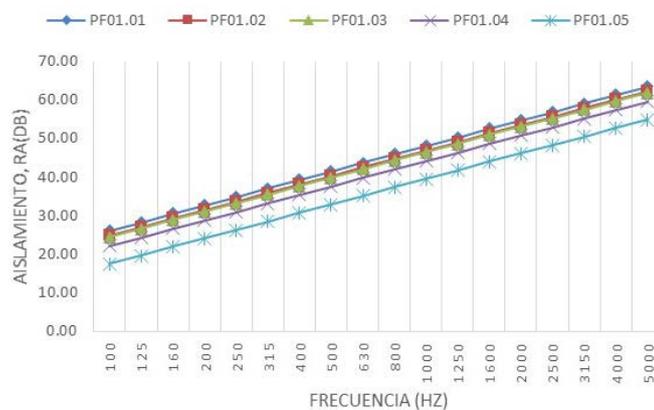
Figura 13. Valores de conductividad de paneles

3.7 Caracterización acústica

Como es conocido, el aislamiento acústico de un material es función directa de su masa, de su densidad. Por esto, son aquellos tipos de paneles con una mayor densidad los que obtienen un mayor valor en términos de aislamiento acústico. De los paneles PF se queda con que un valor término medio aceptable es el del panel del tipo PF0103.



a)



b)

Figura 14. Aislamiento acústico de los paneles en dB: a) Ra; b) Ra según una frecuencia aplicada

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la prueba de absorción y durabilidad se tiene un mejor resultado en aquellos compuestos estabilizados, siendo el mejor resultado para el compuesto estabilizado a base la combinación de ceniza volante y cal y la combinación de polvo de ladrillo y cal. Los compuestos arcillosos sin aplicación de estabilizante perdieron la consistencia en el primer ciclo de la prueba de durabilidad. De los compuestos estabilizados son los que no tienen añadido de puzolanas, o sea el compuesto estabilizado sólo por cal, el que tiene peor resultado en las pruebas de absorción de agua, desorción y durabilidad. El contenido de fibras como refuerzo fibroso demuestra que ayuda parcialmente a tener un mejor resultado en durabilidad.

En este tipo de materiales en base a compuestos arcillosos con este tipo de composición y preparación, es fundamental el uso de refuerzo fibroso para evitar grietas y fisuras por retracción. Habría que revisar también el uso de algún suelo arcilloso con menor proporción de arcilla o añadir más arena para evitar estos problemas por la retracción.

En la prueba de compresión sobre los paneles con formato 30x60x6cm se ve como los paneles con menor proporción de refuerzo fibroso demuestran un mejor comportamiento en su resistencia y en su módulo elástico, teniendo el panel tipo PF0102, aquel que tiene un 1% de contenido fibroso, el mejor resultado en su valor de resistencia a compresión, teniendo en cuenta el esfuerzo límite de diseño, seguido del panel tipo PF0103, con un 2% de contenido de refuerzo fibroso, siendo este último, el panel PF0103 el mejor resultado en el valor del módulo elástico.

Con respecto a otros valores de referencia de otros materiales en base a tierra o pétreo, se observa un valor muy bajo de la resistencia a compresión.

Se observa como baja la resistencia a compresión a medida que aumenta el contenido de paja como refuerzo fibroso, lo que denota la importancia del contenido de la paja para evitar los problemas de retracción pero la influencia negativa que puede tener esta con respecto a la resistencia a compresión.

Los factores que más afectan las características finales del producto son: concentración de los agregados, tamaño y proporción de la paja y un proceso de mezclado que permita asegurar la impregnación de toda la paja, ya que la paja le da refuerzo al panel por ser fibra.

Se considera que es necesario investigar el aumento de la cantidad del estabilizante, la adición de un cementante para aumentar la resistencia del compuesto o el uso de alguna técnica para garantizar el buen acoplado de todos los granos en sus diferentes tamaños, como puede ser un vibrado tras el colado de los compuestos en los moldes.

El panel PF0105, el que tiene mayor contenido de fibra, un 8% en peso, por lo tanto obtiene el mejor resultado, menor conductividad térmica, con un valor por debajo de $0,100 \text{ W/m}\times\text{C}$, por lo que se le puede considerar que tiene carácter de material aislante, presentando el peor resultado el panel PF0101, sin refuerzo fibroso, que no tiene una característica de aislamiento destacada. Como es conocido, el aislamiento acústico de un material es función directa de su masa, de su densidad. Por esto, son aquellos tipos de paneles con una mayor densidad los que obtienen un mayor valor en términos de aislamiento acústico. De entre los paneles PF se concluye con que un valor término medio aceptable es el del panel del tipo PF0103.

El análisis y la interpretación de los resultados que se recolectaron al ensayar los paneles prefabricados, indican que este nuevo sistema de construcción reúne condiciones de factibilidad y funcionalidad en aporte a nivel térmico y acústico, por lo que debe ser tomado en consideración solamente para muros divisorios y fachadas siempre sin carácter portante, en vista de las propiedades mecánicas que se obtuvieron. Se propone que los paneles no sean utilizados de ninguna manera en forma estructural.

Una conclusión importante es la de denominar a este tipo de paneles, tales y como han sido fabricados para la investigación y la experimentación, como paneles semi-prefabricados,

teniendo que llevarlos a un sistema de producción o fabricación en serie con apoyo de equipamiento como para que se les pudiese denominar prefabricados o industrializados.

La ventaja de fabricarlos como se hizo en la investigación es que esto puede hacerse por cualquier persona, sin grandes inversiones ni altos costos. Con una producción en serie, se podría llegar a una optimización, racionalización y ahorro de materia prima y a un mejor detalle final del elemento o panel, lo que se puede plantear como una segunda fase de estudio, su producción masiva o en serie por medio de máquinas o equipo especializado.

Se plantea que en una fase posterior de desarrollo del elemento se puede llevar a hacer un estudio de ciclo de vida, de impacto ambiental, de costos y de factibilidad de puesta en obra y trabajabilidad o maniobrabilidad, lo cual se podría hacer ya sobre el compuesto y panel propuesto en sus diferentes formatos.

Sería de interés, en una fase posterior del proyecto, realizar alguna simulación térmica usando este material aplicado ya en un modelo de vivienda y comparándolo con otros materiales y sistemas constructivos existentes en el mercado.

Como conclusión de los resultados obtenidos en la caracterización del compuesto arcilloso y de los paneles con diferentes cantidades de refuerzo fibroso, se decide optar por la composición base del panel PF0103 para la propuesta de aplicación como panel prefabricado, o semi-prefabricado, dentro de un sistema industrializado de vivienda.

El formato puede ser desde el estudiado en la caracterización 30x60x6cm, como formatos de mayor tamaño, que tendrán que ser caracterizados en futuras investigaciones, de 60x60x6cm, 60x60x9cm, 60x60x12cm o 60x120x12cm, 60x120x6cm, según las necesidades y aplicación.

Por las características del compuesto y del panel se sugiere la aplicación de estos paneles con el apoyo sobre una subestructura y como componente hoja interior de un sistema prefabricado de fachada ventilada, donde se complementen los aportes del panel con otros componentes que sumen a su beneficio.

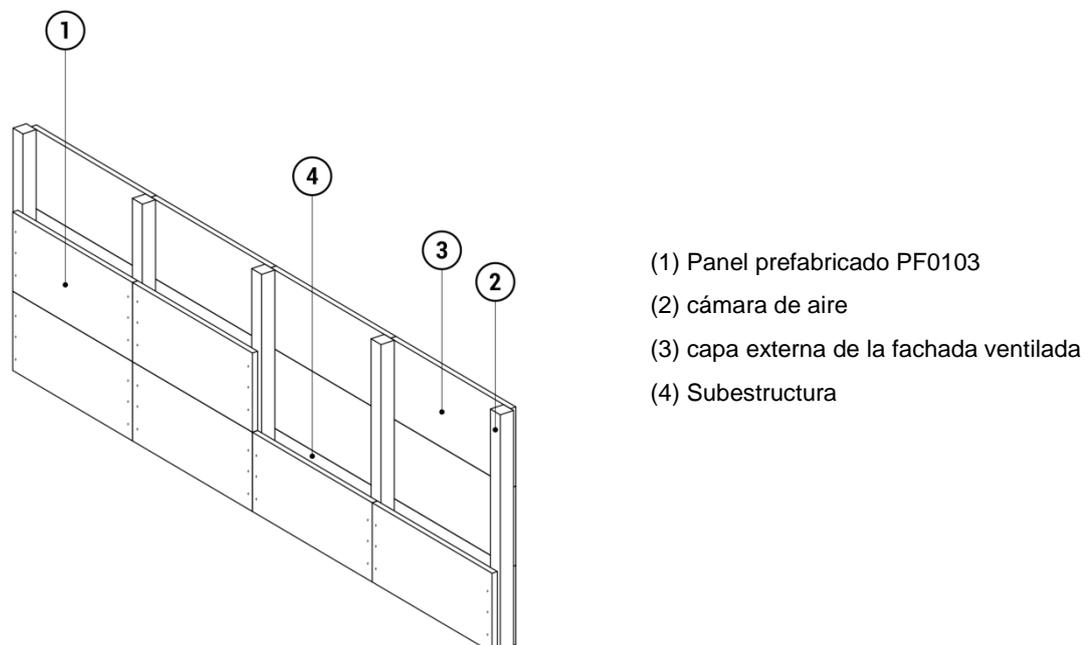


Figura 15. Propuesta de aplicación del panel prefabricado en base a tierra estabilizada dentro de un sistema prefabricado de fachada ventilada, en su formato de panel 30x60x6cm

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318-08 (2008). Building code requirements for structural concrete and commentary. Reported by ACI Committee 318. USA: American Concrete Institute

- Ahmad Bari, N. A.; Yusuff, R.; Ismail, N.; Jaapar, A.; Ahmad, R. (2012). Factors influencing the construction cost of industrialized building system (IBS) Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 35, 689-696
- ASTM E72-02 (2002). Standard test methods of conducting strength tests of panels for building construction. USA: ASTM International
- ASTM E761 / E761M-92(2015) e1 (2015). Standard test method for compressive strength of sprayed fire-resistive material applied to structural members. USA: ASTM International
- Bestraten, S.; Aksogan, O.; Shah A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63, 523, 5-20
- Binici, H.; Aksogan, O.; Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials* 19, 313-8
- Cobrerros, C.; Reyes-Araiza, J. L.; Manzano-Ramírez, A.; Nava, R.; Rodríguez, M.; Mondragón-Figueroa, M.; Miguel Apátiga, L.; Rivera-Muñoz, E. M. (2015). Barley straw ash: pozzolanic activity and comparison with other natural and artificial pozzolans from Mexico. *BioRes*, 10(2), 3757-3774.
- Díaz, C.; Jiménez, M.; Navacerrada, M. A.; Pedrero, A. (2012). Propiedades acústicas de los paneles de Carrizo. *Materiales de Construcción*, 62, 305, 55-66
- Guillaud, H. (2008). Characterization of earthen materials. En: Avrami, E., Guillaud H., Hardy, M., editors. *Terra literature review-an overview of research in earthen architecture conservation*. Los Ángeles: The Getty Conservation Institute
- Hejazi, S.M.; Sheikhzadeh, M.; Abtahi, S.M.; Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials* 30, 100-116
- Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra*. Montevideo: Ed. Nordan-Comunidad,
- Lal, A. K. (1995). *Handbook of low cost housing*. New Delhi: New Age International Publishers
- Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512-519
- Pich-Aguilera, F.; Batlle, T.; Casaldáliga, P. (2008). La arquitectura residencial como una realidad industrial. Tres ejemplos recientes. *Informes de la Construcción* 60, 512, 47-60
- Reddy, B. V .V. (2007). Indian standard code of practice for manufacture and use of stabilized mud blocks for masonry. *International Symposium on Earthen Structures*, Indian Institute of Science, Bangalore, 22-24 August. Bangalore: Ed. Interline Publishing
- Reyes, C. (2009). Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz para componentes de viviendas de bajo coste. Tesis Doctoral. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya
- Salas, J. (2008). De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico, *Informes de la Construcción* 60, 512, 19-34
- Soroushian, P.; Aouadi, F.; Chowdhury, H.; Nossoni, H.; Sarwar, G. (2004). Cement-bonded straw board subjected to accelerated processing, *Cement & Concrete Composites*, 26, 797-802
- Toledo Filho, R.D.; Ghavami, K.; England, G.L.; Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites* 25, 2, 185-196
- Wadel, G.; Avellaneda, J.; Cuchí, A. (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de la Construcción* 62, 517, 37-51
- Zami M. S.; Lee A. (2010). Stabilized or unstabilized earth construction for contemporary urban housing. *Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010)*, 5th International Conference on

AUTORES

Carlos Cobrerros-Rodríguez, profesor investigador en el Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Querétaro, México. Arquitecto por la Universidad de Sevilla, Sevilla, España, Master en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España y Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro.

Línea de investigación en Arquitectura Bioclimática, Sustentabilidad y Materiales de Construcción Sustentables aplicados en la Arquitectura.

J.L. Reyes-Araiza, profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. Tiene 30 años de experiencia en el desarrollo de proyectos en la industria de la construcción y metal mecánica. Tópicos de interés que desarrolla: Materiales compuestos fibroreforzados y con material reciclable; Modelación numérica de problemas físicos de la mecánica e ingeniería civil; Análisis Experimental de Esfuerzos (Fotoelasticidad, extensometría, etc.); Diseño y desarrollo de maquinaria.

A. Manzano-Ramírez, título universitario por la UNAM en la Ciudad de México, México, el año 1981, con estudios de posgrado y doctorado en la University of Sheffield, Inglaterra en el año 1989. Miembro investigador en el CINVESTAV-IPN desde 1989. Posición actual, líder del grupo de Materiales Compuestos en el CINVESTAV-IPN, Unidad Querétaro, autor y coautor de más de 90 publicaciones científicas en revistas internacionales, actas, y libros.