





Metodología basada en técnicas físicas y computacionales para la optimización de un tabicón elaborado con desecho industrial

Methodology based on physical and computational tools to optimize concrete bricks elaborated with post industrial wastes

C. H. Ortiz-Quiroga ^a, V. Volpi-León ^{a,*}, J. C. Seck-Tuoh-Mora ^a, J. Medina-Marín ^a

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El poli óxido de fenileno, conocido como Noryl, es un desecho post industrial que al no tener uso definido es acumulado, generando contaminación. En este trabajo se propone una metodología para la reutilización de este desecho como sustituto de los agregados pétreos en la elaboración de tabicones de concreto ligeros con mejores características físicas. La metodología propone primero generar especímenes de prueba para ser sometidos a pruebas mecánicas, absorción de agua y cálculo de masa volumétrica. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se utiliza una red neuronal para modelar su comportamiento y se aplica un algoritmo de cúmulo de partículas (PSO) para identificar la proporción óptima de Noryl a utilizar en la fabricación de tabicones de concreto. Los resultados obtenidos se probaron físicamente, mostrando que los prototipos modificados presentan una mejora en la resistencia a la compresión con un porcentaje menor de absorción y menor masa volumétrica que los tabicones convencionales.

Palabras Clave:

Reciclaje, Uso de desechos plásticos, Tabicón, Redes neuronales, Algoritmos evolutivos.

Abstract

The aim of this work is the proposal of a methodology to reuse a post industrial waste named Noryl, as a substitute of stone aggregates in making concrete bricks with better physical characteristics than common pieces. Polyphenylene oxide (Noryl) has not any specific use, nowadays, this kind of waste is accumulated increasing levels of pollution. The first stage in methodology is generating experimental prototypes subjected to physical, volumetric mass and water absorption tests. The results are used in a neural network to model their behavior. Subsequently a PSO (particle swarm optimization) algorithm is applied to identify the optimum measure of Noryl in elaboration of concrete bricks. The proposed prototypes were subjected to the same tests as experimental prototypes, and they showed better compressive strength, lower percentage of water absorption and less volumetric mass than ordinary bricks.

Keywords:

Reuse, Post industrial waste, Bricks, Neural network, Evolutionary algorithm.

1. Introducción

En nuestros días, la cultura del reciclaje se ha convertido en uno de los aspectos más importantes en la industria de la construcción. Diariamente, se recolectan en México 86,343 toneladas de basura en las ciudades. Elementos como botellas, plásticos diversos, envolturas de productos, incluso, escombros de construcción, etc.; son desechados sin tener un uso posterior. La mayoría de los plásticos tardan en biodegradarse más de 50 años, además, los lugares para la deposición de basura cada vez son menos, el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto y sólo

13% rellenos sanitarios (SEMARNAT, 2019), por lo que se vuelven pieza importante en la contaminación ambiental. Debido a lo anterior, la posibilidad de reciclar y reutilizar desechos para la generación de nuevos materiales de construcción es una oportunidad para mejorar sus características físicas y mecánicas, además de contribuir en la conservación del ambiente.

La tendencia en el uso de materiales reciclados para la optimización de elementos de construcción ha generado investigaciones con resultados diversos, dependiendo de los materiales aplicados. En la investigación de Martínez y otros (2014), se encontró una alternativa de reutilización del tereftalato

*Autor para la correspondencia: volpi@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: cortiz2994@gmail.com (Carlos Humberto Ortiz-Quiroga), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi-León), jseck@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Seck-Tuoh-Mora), jmedina@uaeh.edu.mx (Joselito Medina-Marín)

de polietileno (PET) proveniente de botellas de plástico, para la generación de ladrillos con cemento y escamas de PET. El prototipo más eficiente se determinó con 50% de PET y 50% de cemento para optimizar su resistencia. La combinación de compósitos de polímero reforzado con un tubo hecho de fibra orgánica de plantas de lino, resultado del desperdicio de la agricultura, con concreto de agregados reciclados (arena de bloques de concreto provenientes de demolición), ha dado como resultado la generación de un prototipo de construcción con características mecánicas mejoradas. (Yan *et al.*, 2017). El reciclaje de plástico y vidrio de botellas de desecho como sustituto de agregados gruesos en la fabricación de concreto se analizó en (Mohammadinia *et al.*, 2019). Si bien la adhesión de los agregados reciclados con el cemento y su resistencia a la compresión, comparados con un concreto convencional, no son de la misma calidad, se encontró que el reemplazo del agregado en un 20% es satisfactorio para el uso que se plantea. En la investigación de Keshavarz y otros (2019) se analizan dos tipos de desechos cerámicos como sustituto de agregado grueso, las pruebas de laboratorio demostraron que los resultados de desechos de porcelana sobresalen en comparación con los de otros cerámicos. La resistencia a la compresión, tensión y flexión incrementó hasta 41%. Se identificó que el mejor rendimiento de la porcelana se debe a que los otros desechos cerámicos tienen más porosidad.

Otros materiales reciclados provenientes de la demolición de concreto y arcilla de ladrillo como agregados han sido utilizados para la generación de nuevos concretos, con sustituciones del 0, 25, 50, 75 y 100% de agregado natural por agregado reciclado, los resultados reportados para dos tipos diferentes de concreto, de acuerdo a diferentes relaciones de agua/cemento, demuestran que los especímenes fabricados con agregado de demolición tienen un comportamiento mejor que el concreto con arcilla de ladrillo (Zheng *et al.*, 2018). Otras aplicaciones en la industria del concreto han considerado el uso de materiales orgánicos reciclados. En la investigación de Peceño y otros (2019), dos tipos diferentes de conchas marinas (almeja peruana y mejillón mediterráneo) se utilizaron para sustituir el agregado grueso en la fabricación de concreto poroso reciclado. Los prototipos con partículas de conchas de entre 2 y 7 mm mostraron un aumento del 40% en el coeficiente de absorción acústica respecto a especímenes de concreto poroso con piedra de río. Asimismo, la resistencia a la compresión también se duplicó respecto a los convencionales.

Una de las propiedades relevantes a optimizar en la fabricación de los materiales de construcción es la ligereza, ya que a medida que los elementos que conforman parte de la estructura de las edificaciones sean más ligeros, menor será el peso de la construcción. Asimismo, las dimensiones de los cimientos se reducirán en dimensiones y posiblemente en material. En el trabajo de Hernández y otros (2013), se generan ladrillos de 10x20x6cm, de concreto celular con poliestireno expandido como agregado, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, absorción y pruebas de tensión; para descubrir que el material obtenido es más ligero que el comercial, es menos permeable, es más flexible, además de ser más económico. En otros trabajos se ha experimentado con la adición de agregados plásticos reciclados de diferentes tamaños, mezclado con agregados naturales en la elaboración de un concreto destinado para vías de ferrocarril. El agregado plástico se obtuvo de rellenos sanitarios, modificado por tratamiento de calor y reducido en diversos tamaños de partícula. Las pruebas a las que se sometieron los especímenes modificados en 10 y 20% de sustituto de agregado de desecho y 2 a 3% de sustitución de cemento por humo de sílice demostraron que a mayor implementación de desecho plástico mejora la trabajabilidad, la resistencia eléctrica y decrece la

densidad, aunque disminuye un poco su resistencia mecánica y su permeabilidad. (Li *et al.*, 2019).

Dada la complejidad en el diseño de mezclas de los prototipos y de las propiedades de respuesta que se obtienen de forma experimental, se han empezado a aplicar para este tipo de estudios técnicas computacionales de inteligencia artificial para el modelado y análisis de sus propiedades. El modelo propuesto por Sipos y otros (2017), identifica las mejores propiedades de las mezclas de concreto con un porcentaje de agregados de tabicón y tejas recicladas, por medio de una red neuronal artificial. Los resultados demostraron que la resistencia mecánica de los concretos con material reciclado depende del tamaño de agregado, de la relación agua/cemento y del porcentaje de sustitución del material reciclado. En la investigación del modelo híbrido inteligente de Shamshirband y otros (2015), se describe el modelado de ladrillos elaborados con cemento, contenido de turba y arena, con la finalidad de estimar el comportamiento mecánico del ladrillo con el uso de un algoritmo de murciélagos.

Si bien, las investigaciones se han enfocado a conocer y modelar el comportamiento de los nuevos materiales constructivos utilizando herramientas emergentes computacionales, aún falta por investigar un gran número de materiales de desecho que podrían mejorar las características de los materiales de construcción, así como una metodología completa que contemple tanto el modelado como la optimización de los diseños de mezcla.

En esta investigación se propone una metodología completa para el reuso de materiales de desecho, que contemple tanto las pruebas físicas como la aplicación de herramientas computacionales inteligentes para la optimización del diseño de mezcla de un elemento de construcción. Esta metodología se aplica para un material producto del desecho industrial de plásticos, denominado Noryl (poli óxido de fenileno), en la elaboración de tabicónes de concreto. Las características de la mezcla utilizando Noryl a diferentes niveles de concentración será primero caracterizada por pruebas físicas, después modelado con una red neuronal y se optimizará con un algoritmo de cúmulo de partículas (PSO) con la finalidad de identificar el diseño que optimice las propiedades del prototipo.

Se eligió elaborar tabicónes por ser elementos ampliamente usados en la construcción de zonas urbanas, de fácil manejo y bajo costo de producción debido a sus dimensiones y materiales. El Noryl es un material de desecho que al ser utilizado originalmente para la fabricación de partes de aparatos electrónicos y artículos de automoción cuenta con propiedades de ligereza y resistencia a altas temperaturas. Debido a estas características físicas y a su disponibilidad como material de desecho industrial de bajo costo, resulta una oportunidad de aplicación para la generación de nuevos materiales de construcción. Al tratarse de la implementación de un nuevo material para la elaboración de prototipos, se utiliza una red neuronal para modelar su comportamiento y un PSO para optimizar las características de absorción, resistencia mecánica, y masa en comparación con los tabicónes comerciales. Estos resultados finalmente se prueban otra vez en laboratorio, encontrando resultados satisfactorios en comparación con los tabicónes comerciales convencionales.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección de materiales y métodos se explica la elaboración de los prototipos con sustitución de agregados naturales por partículas de Noryl en diferentes porcentajes y se desarrolla el análisis de los resultados correspondientes a las pruebas mecánicas. Posteriormente, se propone la metodología para la optimización del diseño de mezcla, basado en el uso de redes neuronales y un algoritmo PSO. En la sección final se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Materiales y métodos

En esta sección se plantean dos conjuntos de métodos para lograr la optimización del diseño de mezcla del prototipo que tenga las mejores características respecto a piezas comerciales. En un primer plano se abordan métodos físicos, correspondientes a la realización de pruebas mecánicas de resistencia, absorción de agua y masa volumétrica para identificar el comportamiento físico de los prototipos con la sustitución de material pétreo por polímero. Posteriormente, se trabajan los métodos computacionales, mediante redes neuronales se modela el comportamiento de los tabicones y se utiliza el modelo resultante para aplicar el algoritmo PSO con el fin de optimizar el diseño de mezcla.

2.1. Materiales utilizados

El Noryl es un polímero sintetizado, se produce por la combinación de polifenileno éter (PPO) y Poliestireno (PS), se clasifica como material termoplástico que soporta temperaturas elevadas, su densidad es de 1.06 g/cm³, tiene una absorción de agua 0.060 a 0.10 %, la temperatura de transición vítrea es de 215°C. Originalmente, sirve para la fabricación de piezas de la estructura de aparatos electrónicos (carcasas de ordenadores), artículos de automoción que soportan altas temperaturas, y otros (Metalium, 2020), (Goodfellow, 2008). A pesar de que el Noryl puede ser reutilizado varias ocasiones, las empresas lo consideran desecho, ya que en el proceso de fundición se mezcla con diferentes plásticos. Al ser un material que conserva sus propiedades físicas, que soporta altas temperaturas, no absorbe grandes cantidades de agua y es ligero y resistente; califica positivamente para implementar su reuso en la industria de la construcción como sustituto de agregados pétreos.

Para elaborar los especímenes de prueba, además de Noryl se utilizaron dos tipos de agregados pétreos naturales, piedra pómez y tezontle color rojo provenientes de un banco de material de la región; ambos fueron tamizados para obtener un tamaño máximo de agregado de 1/2" y un mínimo de 149 micras. La calidad de los agregados se analizó bajo los estándares de la norma ASTM C33-07, NMX C-111-ONNCCE 2014.

El cemento usado fue Portland ordinario, probando que cumpliera con la normativa ASTM C150-07 y la normativa NMX-C-414 ONNCCE-2017. El agua potable se verificó con la norma NMX-C-122-ONNCCE-2019.

2.2. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se sustentó con el método para un concreto convencional establecido en la norma estándar ACI 211.1-9 (Dixon, 1991). Se realizó con las proporciones 1:5:2 (cemento, agregado grueso, agregado fino respectivamente); asimismo, se agregó el 15% de agua potable con respecto de la masa total de los agregados secos.

Para elaborar los especímenes de prueba, las partículas de Noryl sustituyeron el uso de agregados pétreos finos y gruesos en 20, 40, 60, 80 y 100%. Previamente fueron trituradas y tamizadas para obtener un tamaño máximo de 1/2" y un mínimo de 149 micras. En la Tabla 1 se muestran los porcentajes de participación de cada material por cada muestra, en todos los casos, se utilizó 1567.2 g de cemento.

Tabla 1. Porcentajes de Noryl para cada muestra de mezcla.

Muestra	Noryl(%)	Tezontle(%)	Pómez(%)	Agua(ml)
M1	100	0	0	571.8
M2	80	10	10	594.4
M3	60	20	20	617.0
M4	40	30	30	639.7
M5	20	40	40	662.3

2.3. Elaboración de prototipos

Para la fabricación de los prototipos se diseñó un molde de madera bajo la normativa mexicana NMX-C-038-ONNCCE 2013. Las dimensiones interiores fueron 10*14*28 cm, se perforaron dos orificios de 2" de diámetro en la base del molde, los cuales fueron ocupados por tubo PVC (policloruro de vinilo) del mismo diámetro, ver Figura 1 Una vez que fraguó la mezcla depositada en el molde los tubos fueron retirados. El concreto se mezcló manualmente y se depositó en el molde en capas, se compactó con ayuda de una varilla de 10 mm de diámetro, 25 penetraciones por capa, se golpearon ligeramente las paredes del molde con un mazo de hule para eliminar posibles oquedades por el uso de la varilla. Una vez vertida la mezcla, se logró la superficie plana con un enrasador de metal.

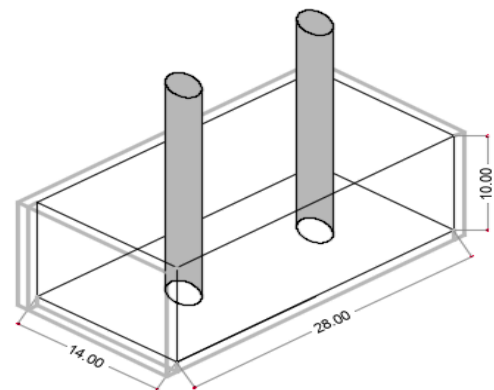


Figura 1. Características del molde para la fabricación de prototipos.

Una vez vertido el concreto en los moldes, se dejó fraguar por 24 horas a la sombra a temperatura ambiente. A continuación, se desmoldaron los especímenes y se impregnaron de agua para conservar humedad y favorecer el proceso de curado, se cubrieron con plástico por siete días a una temperatura ambiente para alcanzar su resistencia inicial. Posteriormente, se dejaron inmóviles durante 28 días, procurando mantener la humedad superficial mediante el rociado de agua, una vez al día.

2.4. Pruebas de laboratorio

Las propiedades de los especímenes fueron obtenidas mediante las siguientes pruebas de laboratorio:

- Resistencia a la compresión (a los 28 días de edad)
- Absorción de agua
- Masa volumétrica

2.4.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una de las características mecánicas más valorada en los elementos de construcción, ya que está relacionada con la durabilidad. En la prueba de compresión se define la calidad estructural y resistencia al intemperismo de los prototipos. El método de prueba está referido en la normativa NMX-C-036-ONNCCE-2013 y en la NMX-C-441-ONNCCE-2011 donde se indican los parámetros de resistencia mínima requerida a los siete, 14 y 28 días de edad de las piezas. En este caso, la resistencia para un bloque hueco de uso no estructural, debe ser $f_{pMin} = 24 \text{ kg/cm}^2$ y su resistencia media $f_p = 30 \text{ kg/cm}^2$.

2.4.2. Absorción de agua

Esta prueba se realiza con la finalidad de determinar la cantidad de agua que pueden absorber los materiales de forma individual y el espécimen ya fraguado. Este dato sirve de referencia en el diseño de mezcla para la relación agua/cemento. En el proceso se deben obtener dos masas, una correspondiente al material seco suelto y la masa de los materiales saturados superficialmente secos. Para la determinación de absorción del espécimen se registra su masa seca y su masa después de haber sido sumergida por un periodo de 24 hrs. Las especificaciones y métodos de ensayo de esta prueba se encuentran en las normativas NMX-C-166-ONNCCE-2018 y NMX-C-037-ONNCCE-2012.

2.4.3. Masa volumétrica

La masa volumétrica es la masa del material por unidad de volumen, es aplicable para agregados secos y se expresa en kg/m^3 . El volumen que ocupa el material se determina mediante un recipiente de volumen conocido. El procedimiento experimental para determinar la masa volumétrica en los agregados finos y gruesos o la combinación de ambos, se puede realizar en agregados con un tamaño máximo nominal menor a los 150 mm. Las especificaciones y métodos de ensayo de esta prueba se encuentran en la normativa NMX-C-073-ONNCCE-2004.

2.5. Métodos computacionales

Aquí abordaremos los dos métodos computacionales utilizados en nuestra metodología, primero las redes neuronales para modelar el comportamiento del tabicón usando Noryl como agregado, y después un algoritmo de cúmulo de partículas (PSO) para utilizar la red neuronal y encontrar el porcentaje adecuado de Noryl que alcance los objetivos de diseño en la fabricación de tabicones.

2.5.1. Redes neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son herramientas informáticas de aprendizaje las cuales pueden ser aplicadas a sistemas físicos que presentan patrones de funcionamiento no lineal. Las RNA poseen un sistema de procesamiento de información compuesto por un gran número de elementos simples llamadas neuronas. Cada neurona está conectada con otras neuronas mediante enlaces de comunicación que tienen asociados pesos neuronales específicos. Los pesos son coeficientes adaptativos que representan la información utilizada por la red para modelar un problema determinado como se muestra en la Figura 2.

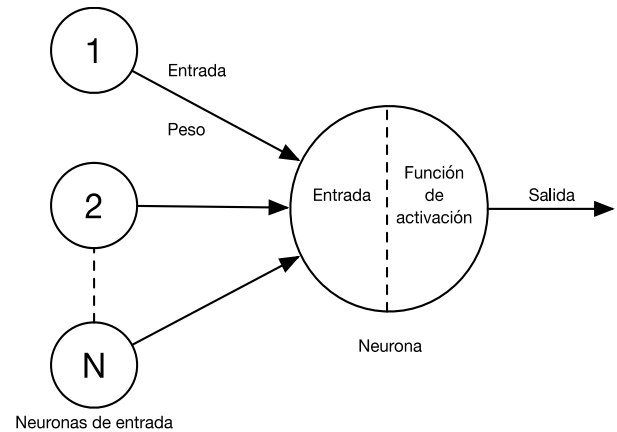


Figura 2. Funcionamiento general de una neurona artificial.

Las neuronas que componen a una RNA son organizadas y combinadas jerárquicamente para poder formar capas. Una capa o nivel es un conjunto de neuronas cuyas entradas de información provienen de la misma fuente (que puede ser otra capa de neuronas) y cuyas salidas de información se dirigen al mismo destino (que puede ser otra capa de neuronas). En este sentido, se distinguen tres tipos de capas, ver Figura 3.

Capa de entrada: también denominada sensorial, se encuentra compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno.

Capas ocultas: son aquellas cuyas entradas y salidas se encuentran dentro del sistema y, por tanto, no tienen conexión directa con el entorno. Este tipo de capa oculta proporciona grados de libertad a la red neuronal gracias a los cuales es capaz de representar más fehacientemente determinadas características del entorno que trata de modelar.

Capa de salida: se compone de neuronas que proporcionan la respuesta de la red al exterior.

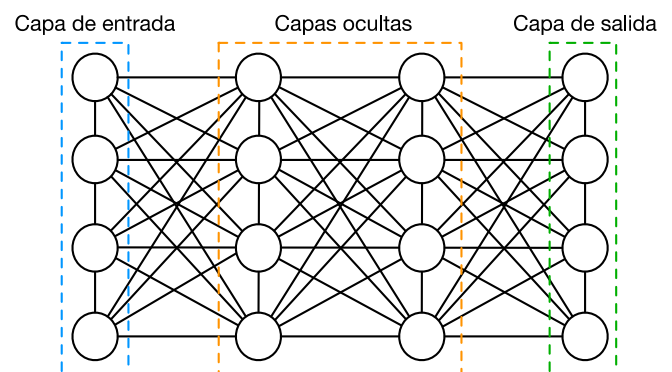


Figura 3. Red neuronal artificial.

Las RNA aprenden de la experiencia mediante un entrenamiento con datos que contienen características e información suficiente de la dinámica real del sistema físico bajo análisis.

Mediante este entrenamiento o aprendizaje, las RNA crean su propia representación del problema y son capaces de generalizar el comportamiento global del sistema real. Esta característica es fundamental ya que permite a la red responder correctamente ante informaciones novedosas, distorsionadas o incompletas de manera adecuada.

2.5.2. Algoritmo de cúmulo de partículas (PSO)

El algoritmo de cúmulo de partículas (particle swarm optimization o PSO) es un algoritmo estocástico de búsqueda basado en poblaciones de insectos, pájaros y peces. El PSO simula el comportamiento social de estos grupos denominados “enjambres”. Un enjambre se define como un grupo de individuos en constante comunicación directa o indirecta dentro de su entorno.

La población inicial se determina aleatoriamente, cada partícula se desplaza a través del espacio de búsqueda y recuerda la mejor posición que ha encontrado. La habilidad de una partícula para encontrar soluciones se representa por su vector velocidad, el cual dirige el movimiento de la partícula de una posición a otra. Cada partícula comunica las buenas posiciones al enjambre y dinámicamente ajustan su propia posición y su velocidad con base en el comportamiento histórico de las buenas posiciones para dirigirse a un mejor espacio de búsqueda en el proceso de minimización de la función objetivo. De esta forma se logran soluciones a diversas problemáticas mediante estrategias colectivas (Shi *et al.*, 2001).

En este trabajo se utiliza la versión global del PSO. Esta versión establece que, en cada iteración del algoritmo, cada partícula va cambiando su velocidad (aceleración) hacia la ubicación pbest (mejor posición individual) y gbest (mejor posición global). La aceleración se pondera aleatoriamente, con distintos números aleatorios generados para la aceleración hacia los lugares de pbest y gbest (Eberhart *et al.*, 2001).

La velocidad de una partícula i es actualizada de acuerdo con (1)

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1[\hat{x}_i(t) - x_i(t)] + c_2r_2[g(t) - x_i(t)] \quad (1)$$

Debido a la actualización de la velocidad de la i -ésima partícula, es necesario realizar el cálculo de la su posición actual a través de (2)

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

La ecuación (2) representa la influencia adaptativa de la anterior posición y la velocidad calculada.

Los términos representados en las ecuaciones de la velocidad y posición de la partícula x_i se describen a continuación:

- w es el coeficiente de inercia el cual se encuentra en rangos entre 0.8 a 1.2. Los valores bajos de la inercia aceleran la convergencia, mientras que valores altos fomentan la exploración del espacio de búsqueda.
- c_1 y c_2 son los coeficientes de aceleración que se encuentran en el rango $0 \leq c_1, c_2 \leq 2$, conocidos también como componentes cognitivos y sociales.
- r_1 y r_2 son valores aleatorios que se encuentran en el rango $0 \leq r_1, r_2 \leq 1$, dichos valores se regeneran cada vez que se actualiza la velocidad.
- $v_i(t)$ es la velocidad de la partícula i en el tiempo t .
- $x_i(t)$ es la posición de la partícula i en el tiempo t .
- $\hat{x}_i(t)$ es la mejor posición individual de la partícula i en el tiempo t (pbest).
- $g(t)$ es la mejor partícula del enjambre en el tiempo t (gbest).

La Figura 4 presenta de forma gráfica la actualización de una partícula tomando en cuenta la posición de su mejor posición temporal y la mejor posición actual en el enjambre.

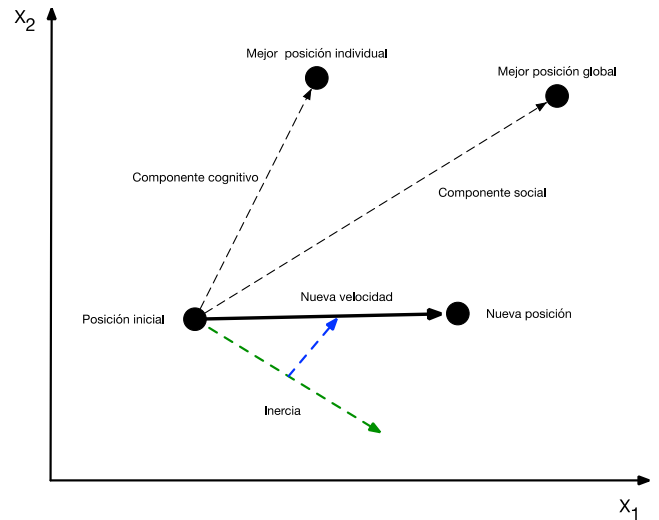


Figura 4. Funcionamiento del algoritmo PSO.

3. Metodología de diseño

Con la finalidad de obtener un prototipo capaz de competir con las piezas convencionales y que tuviera mejores resultados, se consideraron tres objetivos de diseño a alcanzar:

- % de Absorción: La normativa aplicable considera un porcentaje de absorción máximo del 20%, sin embargo, se busca un prototipo que de acuerdo a las características de los materiales utilizados, se encuentre entre el 14 a 15% de absorción.
- Esfuerzo de resistencia: Las normas mexicanas indican que un tabicón de uso no estructural debe alcanzar un fp^* mayor a 35 kg/cm² con el prototipo propuesto se espera obtener un fp^* de 40 a 41 kg/cm².
- Masa: Los prototipos convencionales se ubican entre los 5 y 6 kg; el prototipo se propone entre 4 y 4.2 kg.

Para la obtención del tabicón con las mejores características se lleva a cabo el siguiente proceso: Inicialmente, se realizan pruebas físicas a un conjunto de prototipos con 20 al 100% de sustitución de material pétreo por polímero Noryl. Estas pruebas incluyen tres variables medibles: resistencia a la compresión en kg/cm², porcentaje de absorción de agua y masa de la pieza. Posteriormente, se entrena la red neuronal que simula el comportamiento físico de los prototipos basado en los resultados de las variables anteriores. Se obtiene la simulación del comportamiento de prototipos con porcentajes de sustitución diferentes a los experimentados inicialmente. Se aplica el algoritmo PSO sobre la red generada para identificar la red que muestra el mejor modelado, con un error cuadrático mínimo. El siguiente paso consiste en analizar el porcentaje de mezcla que mostrará los mejores resultados con relación a las variables a medir. Se elaboran los prototipos con dicho porcentaje y se verifican los resultados a través de pruebas físicas. El diagrama de flujo de la metodología propuesta se representa en la Figura 5.

4. Aplicación de la metodología

Para obtener resultados aceptables para las tres variables anteriormente descritas (% de absorción, esfuerzo de resistencia y masa volumétrica), se seguirán los pasos de la metodología de diseño. La primera parte de la metodología consiste en la elaboración de los prototipos y la realización de las pruebas físicas

para tener un registro del comportamiento de los tabicones con diferentes porcentajes de Noryl como sustituto de agregado pétreo. La segunda parte consiste en tomar los resultados de la prueba para establecer la red neuronal y tomar esta como modelo computacional para optimizar el porcentaje de Noryl a utilizar aplicando un algoritmo PSO. Los resultados numéricos obtenidos se comprueban con otras pruebas físicas finales para corroborar que los tabicones obtenidos cumplan con los objetivos de diseño especificados.

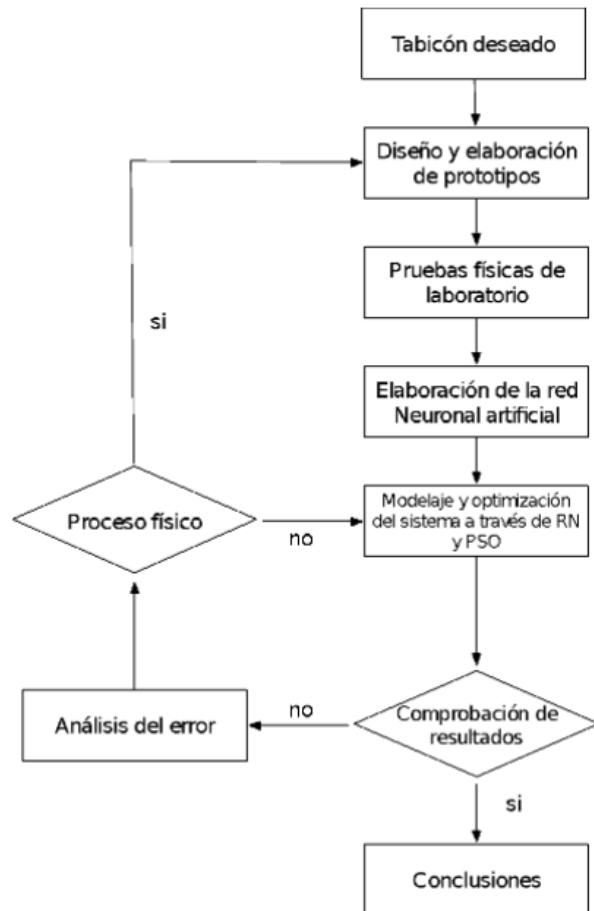


Figura 5. Metodología propuesta para la optimización del diseño de tabicón con elementos de desecho.

4.1. Resistencia a la compresión

Se ensayaron tres tabicones por cada porcentaje de sustitución para obtener una muestra representativa. Al finalizar el periodo de 28 días, en los que los especímenes alcanzaron su resistencia final, se procedió a ensayarlos para determinar su resistencia mecánica. La prueba se realizó en una prensa de compresión simple de 130 ton/cm², marca Davi. Existen ligeras variaciones debidas al método artesanal con el que fueron elaborados los especímenes, sin embargo, la ruptura que presentaron en el ensayo refiere a una falla común en la zona media.

Los resultados se presentan en la Tabla 2, la cual muestra que los prototipos con 100% de sustitución de agregados pétreos por Noryl tienen una resistencia superior a la compresión, siendo los especímenes de 20% de sustitución los que presentan la resistencia más baja.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de compresión con diferentes porcentajes de sustitución de Noryl

% Sustitución	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Media (kg/cm ²)	Media fp* (kg/cm ²)
100	132.48	146.36	150.33	143.06	75.42
80	87.00	91.10	95.20	91.10	48.59
60	76.65	74.28	76.01	75.65	40.34
40	55.05	49.66	49.86	51.52	27.48
20	40.50	32.71	35.58	36.26	19.34

4.2. Absorción de agua

Para la prueba de absorción se obtuvieron las masas de los agregados finos y gruesos y de los especímenes de 28 días de edad secos y saturados superficialmente secos. En el proceso se introdujeron en agua cantidades específicas de agregados a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas, posteriormente, se colocaron en el horno a una temperatura de 110°C con rango de error de +/- 5°C durante 24 hrs.

Los resultados observados en la Tabla 3 muestran que los prototipos con mayor porcentaje de Noryl en la mezcla presentan una absorción menor en comparación con los especímenes con 20% de Noryl, los cuales reflejan la mayor absorción de agua.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de absorción de agua con diferentes porcentajes de sustitución de Noryl

% Sustitución	Espécimen 1 % absorción	Espécimen 2 % absorción	Espécimen 3 % absorción	Promedio % absorción
100	8.57	8.11	8.85	8.51
80	14.14	13.87	13.77	13.93
60	15.09	14.77	15.11	14.99
40	16.95	15.61	16.85	16.47
20	16.12	16.31	19.32	17.24

4.3. Masa volumétrica

Transcurridos 28 días de la elaboración de los prototipos, se introdujeron en el horno a una temperatura de 110°C con rango de error de +/- 5°C durante 24 h para obtener su masa secos. Se determinó la masa y el volumen correspondiente. Los resultados mostrados en la tabla indican un ligero incremento en la masa de los especímenes con mayor cantidad de Noryl en la mezcla, ver Tabla 4.

Tabla 4 Resultados de las pruebas de masa con diferentes porcentajes de sustitución de Noryl

% Sustitución	Espécimen 1 masa (kg)	Espécimen 2 masa (kg)	Espécimen 3 masa (kg)	Promedio masa (kg)
100	4.64	4.54	4.45	4.54
80	4.15	3.57	4.07	4.11
60	4.27	4.07	4.3	4.21
40	4.37	3.98	4.19	4.18
20	3.97	3.74	3.83	3.85

La variación en masas de un tipo de espécimen a otro indica que el incremento de noryl en la mezcla refleja masas más elevadas.

4.4. Red neuronal artificial

Para el entrenamiento de la red neuronal que modela el comportamiento físico de los tabicones, se utilizaron los resultados de los prototipos con porcentajes de sustitución de 20, 40, 60, 80 y 100%. A partir de ellos, se realizó el entrenamiento de la red y se obtuvo una aproximación de diferentes combinaciones de sustitución de agregado pétreo.

La red neuronal artificial con la que trabajamos fue desarrollada a través del toolbox de Matlab R2015 con el algoritmo de entrenamiento de Levenberg-Marquardt el cual, en su composición integra el método de gradiente descendente.

Se probaron de forma iterativa varias combinaciones de números de capas y de neuronas por capa para definir la arquitectura de la red con mejores resultados. Dicho proceso intercalaba los rangos propuestos de capas (de 1 a 3 capas), y el rango de neuronas por capa (de 1 a 5 neuronas). Al final, se seleccionó la red con el menor error cuadrático medio entre las respuestas reales de las pruebas de esfuerzo a la compresión, absorción de agua a 24 h y la cantidad de masa volumétrica promedio de los especímenes de prueba, y las estimadas por la red.

Con este proceso, la mejor red que se obtuvo tiene 3 capas, cada una con el número de neuronas que se describe en la Figura 5.

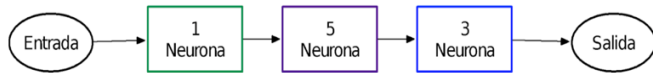


Figura 5. Esquema de la estructura final de la red neuronal artificial.

Con esta arquitectura se obtuvo un error cuadrático medio de $9.52e-11$, lo que muestra el ajuste cercano que obtiene la red para reproducir el comportamiento del tabicón a diferentes porcentajes de sustitución de Noryl.

4.5. Algoritmo de cúmulo de partículas

Para poder realizar el proceso de optimización se recurrió al algoritmo de cúmulo de partículas (PSO), el cual tomó como modelo la red neuronal artificial seleccionada para simular el comportamiento de los prototipos con sustitución de Noryl como agregado pétreo.

Al algoritmo PSO se programó directamente en Matlab R2015 y se le proporcionaron los siguientes parámetros generales para comenzar con la optimización del sistema:

- No. de individuos: 30
- No. de evoluciones: 300

Como espacio de búsqueda, cada individuo toma inicialmente un valor aleatorio entre 20 y 100 para representar el porcentaje de sustitución. Cada uno de estos valores se introdujo como parámetro de entrada a la red neuronal para obtener las respuestas de esfuerzo de resistencia, absorción de agua y masa volumétrica.

Los valores deseados para estos 3 objetivos de diseño se establecieron de la siguiente forma:

- Esfuerzo de resistencia: 40 a 41 kg/cm²
- Absorción de agua: 14 a 15%
- Masa volumétrica: 4 a 4.2 kg

Estos valores se eligieron para generar un tabicón que posea las características adecuadas para ser competitivo comercialmente. Dado que se desea optimizar de igual forma los 3 objetivos de diseño, la función costo se definió como lo indica (3).

$$\text{costo} = 1/(\text{cal}_r + \text{cal}_a + \text{cal}_m) \quad (3)$$

La función costo en (3) toma el inverso de la suma de las calificaciones de cada objetivo de diseño, de esta manera, mientras mejor sean las calificaciones de cada objetivo, la función costo será menor y el objetivo general será la minimización de (3). Las calificaciones de cada objetivo deseado se calculan de la siguiente manera:

$$\text{cal}_r = |\text{res}_{est} - \text{min}_r| / (\text{max}_r - \text{min}_r) \quad (4)$$

$$\text{cal}_a = |\text{abs}_{est} - \text{max}_a| / (\text{max}_a - \text{min}_a) \quad (5)$$

$$\text{cal}_m = |\text{masa}_{est} - \text{max}_m| / (\text{max}_m - \text{min}_m) \quad (6)$$

Para evaluar la resistencia en (4), se toma el valor absoluto de la resistencia estimada en la red neuronal menos la mínima resistencia deseada. Este valor será más grande mientras más alejada esté la estimación de la mínima resistencia, provocando un valor menor de (3). Para el caso de la absorción, se toma la diferencia entre la absorción estimada y la máxima absorción deseada para favorecer que el valor de (5) sea más grande con valores alejados de la máxima absorción y así obtener un menor valor de (3). Algo similar se realiza en (6) para favorecer un diseño de mezcla con agregado de Noryl que dé como resultado tabicones más ligeros. Terminado el proceso de optimización por el PSO, el algoritmo obtuvo los siguientes resultados estimados:

- Porcentaje de sustitución de Noryl: 57%
- Resistencia estimada: 39.99 kg/cm²
- Absorción de agua estimada: 14.91%
- Masa volumétrica estimada: 4.13 kg

4.6. Comprobación experimental de resultados

Una vez obtenido el diseño de mezcla optimizado y los posibles valores de su comportamiento ante las pruebas físicas solicitadas, se prosiguió a la creación de 3 nuevos especímenes los cuales cumplieran con las dosificaciones necesarias para respetar el diseño de mezcla de 57% de sustitución de agregados pétreos por Noryl. Nuevamente, se dejó pasar un periodo de maduración de 28 días para poder realizar las pruebas de laboratorio y de esta manera corroborar los datos obtenidos del modelaje para este diseño de mezcla. Los resultados promedio para los 3 objetivos de diseño se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados promedio de los especímenes con 57% de sustitución de Noryl como agregado pétreo

Promedio de esfuerzo a la resistencia	Promedio de absorción de agua	Promedio de masa volumétrica
40.01 kg/cm ²	14.9%	3.98 kg

Estos resultados muestran que la metodología empleada consiguió cumplir con los objetivos de diseño, obteniendo en promedio un tabicón con la resistencia y absorción requerida, y con una masa menor al deseado.

5. Conclusiones

En esta investigación se propuso una metodología para el reuso de material de desecho Noryl (poli óxido de fenileno) en la elaboración de prototipos de tabicón comparados con piezas convencionales. Se elaboraron especímenes experimentales que fueron sometidos a pruebas físicas; con los resultados se realizó el modelado de una red neuronal y se optimizaron las propiedades de la mezcla mediante la aplicación del algoritmo de cúmulo de partículas (PSO). El diseño de mezcla optimizado arrojó el 57% de sustitución de material pétreo por Noryl. Los resultados del prototipo indicaron una resistencia a la compresión de 40.01 kg/cm², una absorción promedio de 14.9% y una masa volumétrica de 3.98 kg, por lo que el prototipo cumple con los parámetros establecidos en normativas vigentes.

La implementación de una metodología para la reutilización de Noryl (material de desecho) en la industria de la construcción, específicamente en la elaboración de tabicones de concreto, permite identificar las características físicas y mecánicas de prototipos para optimizar las características de masa, absorción y resistencia a la compresión y así poder competir como alternativa ante tabicones convencionales.

Esta metodología puede utilizarse para probar otros tipos de agregados pétreos emergentes en la elaboración de tabicones no convencionales, o adaptarse también para la prueba y optimización de otros elementos de construcción que utilicen materiales de desecho.

El uso de material de desecho en la industria de la construcción es relativamente nuevo, por lo que la información es limitada, asimismo, la adquisición del material solo funciona en grandes cantidades para ser rentable de forma comercial. La manufactura de elementos de manera artesanal produce un margen de error mayor, por lo que esta metodología debe probarse con la generación de especímenes utilizando métodos industriales.

Para investigaciones posteriores se sugiere un diseño de experimentos en el que se modifique la cantidad de agregados pétreos para tener una perspectiva más amplia del comportamiento de los prototipos modificados y así obtener nuevos diseños de mezclas optimizadas.

Se propone la aplicación y experimentación con nuevos materiales de desecho que se clasifiquen como polímeros para identificar nuevas alternativas de tabicones. Por último, otros algoritmos evolutivos pueden ser empleados para realizar un estudio comparativo y poder concluir cuál de ellos ofrece mejores resultados para optimizar el diseño de materiales constructivos elaborados con materiales de desecho.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, quien prestó las instalaciones de laboratorios del AAIyA para la generación y pruebas físicas y mecánicas de los prototipos. Este trabajo ha sido también realizado parcialmente gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por medio de los proyectos CB-2017-2018-A1-S-43008 y s CB- 2014-237323.

Referencias

- ASTM International. (2007). *Standard Specification for Concrete Aggregates* (ASTM C33-07). West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/C0033-07
- ASTM International. (2007). *Standard Specification for Portland Cement* (ASTM C150-07). West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/C0150-07
- Dixon, D. E., Prestreza, J. R., Burg, G. R., Chairman, S. A., Abdun-Nur, E. A., Barton, S. G., ... & Lee, S. H. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) 1-38.
- Eberhart, R. C., & Shi, Y. (2001, May). Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546) (Vol. 1, pp. 94-100). IEEE. DOI: 10.1109/CEC.2001.934376
- Hernández-Zaragoza, J. B., López-Lara, T., Horta-Rangel, J., López-Cajún, C., Rojas-González, E., García-Rodríguez, F. J., & Adué, J. (2013). Cellular concrete bricks with recycled expanded polystyrene aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. DOI:10.1155/2013/160162
- Keshavarz, Z., & Mostofinejad, D. (2019). Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033>
- Lí, D., & Kaewunruen, S. (2019). Mechanical properties of concrete with recycled composite and plastic aggregates. *International Journal*, 17(60), 231-238. DOI: <https://doi.org/10.21660/2019.60.8114>
- Martínez, A., & Cote, M. (diciembre de 2014). Diseño y fabricación de ladrillo reutilizando materiales a base de PET. *INGE CUC*, 10(2), 76-80.
- Mohammadinia, A., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2019). Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths. *Construction and Building Materials*, 197, 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.192>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2011). *Industria de la construcción-Mampostería-*

- Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso no estructural-Especificaciones y Métodos de ensayo* (NMX-C-441-ONNCCE-2011). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2013). *Industria de la Construcción- Mampostería-Determinación de las Dimensiones de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones- Método de Ensayo* (NMX-C-038-ONNCCE 2013). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2017). *Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Ensayo* (NMX-C-111-ONNCCE-2017). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2017). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo* (NMX-C-414 ONNCCE-2017). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2019). *Industria de la Construcción-Agua para concreto-Especificaciones* (NMX-C-122-ONNCCE-2019). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2011). *Industria de la construcción-Mampostería-Resistencia a la compresión de bloques, tabiques (ladrillos y tabicones) y adoquines-Método de ensayo* (NMX-C-036-ONNCCE-2013). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2011). *Industria de la Construcción-Agregados-Contenido de agua por secado-Método de ensayo* (NMX-C-166- ONNCCE-2018). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2011). *Industria de la Construcción-Mampostería-Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones-Método de ensayo* (NMX-C-037-ONNCCE-2012). Diario Oficial de la Federación, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2011). *Industria de la Construcción-Agregados-masa volumétrica-Método de prueba* (NMX-C-073-ONNCCE-2004). Diario Oficial de la Federación, México.
- Pecceño, B., Arenas, C., Alonso-Fariñas, B., & Leiva, C. (2019). Substitution of coarse aggregates with mollusk-shell waste in acoustic-absorbing concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6), 04019077. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002719
- Plásticos especiales. (2020). Metalium. [https://metalium.mx/plasticos-especiales/noryl-en-265-\(ppo\)/NORYL#](https://metalium.mx/plasticos-especiales/noryl-en-265-(ppo)/NORYL#)
- Polioxido de Fenileno (PPO (modificado), PPE (modificado)) Información sobre el Material. (2008). Goodfellow Corporation. <http://www.goodfellowusa.com/S/Polioxido-de-Fenileno.html>
- SEMARNAT. (2019, enero). Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es#:~:text=Sin%20embargo%2C%20en%20M%20C%20A9xi%20el,residuos%20tiene%2C%20una%20relevancia%20fundamental>
- Shamshirband, S., Tavakkoli, A., Roy, C. B., Motamedi, S., Song, K. I., Hashim, R., & Islam, S. M. (2015). Hybrid intelligent model for approximating unconfined compressive strength of cement-based bricks with odd-valued array of peat content (0–29%). *Powder Technology*, 284, 560-570. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.026>
- Shi, Y., & Eberhart, R. C. (2001, May). Fuzzy adaptive particle swarm optimization. In Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546) (Vol. 1, pp. 101-106). IEEE. DOI: 10.1109/CEC.2001.934377
- Sipos, T. K., Milicevic, I., & Siddique, R. (2017). Model for mix design of brick aggregate concrete based on neural network modelling. *Construction and building materials*, 148, 757-769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.111>
- Yan, B., Huang, L., Yan, L., Gao, C., & Kasal, B. (2017). Behavior of flax FRP tube encased recycled aggregate concrete with clay brick aggregate. *Construction and Building Materials*, 136, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.046>
- Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., & Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9, 1317-1322. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>