

## Comparativa de perfil de carbonatación entre tabicones macizos de noryl y convencionales Comparison of carbonation profile between conventional and Noryl-made solid blocks

V. Volpi-León <sup>a,\*</sup>, L. D. López-León <sup>a</sup>, J. R. Serralde-Lealba <sup>a</sup>, A. González-de la Fuente <sup>a</sup>, C. A. Bigurra-Alzati <sup>a</sup>,  
M. E. Sánchez Roldán <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

Una tendencia en el área de la edificación es elaborar elementos constructivos con material de desecho diversos, mostrando buenos resultados en pruebas físicas experimentales en comparación con prototipos convencionales. En este trabajo se elaboraron tabicones macizos de concreto modificados sustituyendo un porcentaje de material pétreo por polímero Noryl (poli óxido de fenileno). Un punto importante para considerar en el uso de este tipo de elementos es la prueba de carbonatación, la cual sirve como instrumento para simular de forma acelerada el daño por esta reacción química en los especímenes sometidos a un ambiente agresivo. El objetivo de esta investigación fue analizar los perfiles de carbonatación de los distintos especímenes con la prueba de fenolftaleína y medición de pH. Los resultados muestran una disminución en el proceso de carbonatación de los especímenes modificados en comparación con los tabicones comerciales.

*Palabras Clave:* Tabicones ecológicos, perfil de carbonatación, Noryl, reciclaje de desechos.

### Abstract

Waste recycling is an important trend in the construction research field. Several materials are tested and compared with conventional prototypes, looking for similar physical and chemical features. In this work, solid concrete blocks were made by substituting a portion of stone aggregates with Noryl polymer (polyphenylene oxide). Carbonation is an important chemical reaction that must be studied in this type of element. Therefore, specimens were exposed to an aggressive environment that rapidly simulates the carbonation damage over the years. This research aimed to analyze the carbonation profiles of the different specimens with the phenolphthalein test and pH measurement. The results show a decrease in the carbonation process of the modified specimens compared with the commercial blocks.

*Keywords:* ecological blocks, carbonation profile, Noryl, waste recycling.

## 1. Introducción

La carbonatación en el concreto es una condición importante de considerar ya que afecta de forma negativa la estabilidad y la vida útil de las estructuras construidas con este material (Chinè, 2019). Este fenómeno sucede como un complejo proceso fisicoquímico en el que los elementos de concreto van sufriendo cambios en sus propiedades físicas desde el exterior hacia su interior (Vidaud & Vidaud, 2012).

Un factor significativo que puede provocar esta condición de degradación es la cantidad de CO<sub>2</sub> en el ambiente (Hihara *et al.*, 2013). Debido a que el concreto puede presentar porosidad, el parámetro de humedad se vuelve determinante

para que el dióxido de carbono penetre por dichos poros y por consecuencia afecte al concreto en la disminución del nivel de pH (Hussain *et al.*, 2010). Asimismo, la humedad o saturación de agua puede manifestarse de manera opuesta en el proceso de la carbonatación, ya que, un exceso de agua puede impedir la carbonatación debido a la disminución de área de contacto en el concreto (Otero, 2001). De la misma forma, la escasez de agua evita que se lleve a cabo tal reacción, ya que el medio acuoso es indispensable (Gómez & González, 2017). Estudios recientes han detectado que la carbonatación provoca agrietamientos en elementos de concreto (Maldonado *et al.*, 2017), lo cual afecta su resistencia.

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

Correo electrónico: volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi León), luis\_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López León), juan\_serralde@uaeh.edu.mx (Juan Rubén Serralde Lealba), alejandro\_gonzalez@uaeh.edu.mx (Alejandro González de la Fuente), carlos\_bigurra@uaeh.edu.mx (Carlos Alfredo Bigurra Alzati) carlos\_bigurra@uaeh.edu.mx (María Elena Sánchez Roldán)

En la industria de la construcción, los bloques y tabicones de concreto son los elementos de mayor demanda por su accesibilidad y fácil manipulación, sin embargo, los procesos para su elaboración generan un daño colateral importante al ambiente (Lew, 2004). Tan solo en 2016 se consumieron 4,129 millones de toneladas de cemento (ICR, 2017). Según datos de INEGI, (2014) son generados diariamente a nivel nacional 102,887.3 toneladas de residuos sólidos urbanos, de los cuales, principalmente se refieren a residuos de construcción y demolición (RCD).

Por otro lado, la generación de equipos y piezas elaborados con plásticos y polímeros diversos va en aumento. Una vez alcanzada la vida útil de los dispositivos, las partes que los componen se desechan sin tener otro uso. El polímero noryl, material compuesto por poliestireno y óxido de polifenileno, es uno de los materiales de mayor demanda en la industria; originalmente es usado en la construcción de piezas de equipos electrónicos y eléctricos, revestimientos, maquinaria, etc, (Metalium, 2020). Al pertenecer a los termoplásticos, cuenta con buenas propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, y es de baja gravedad específica (SABIC, 2022). El noryl es reutilizable, aunque en algunas industrias es considerado como desecho después de mezclarse con otros plásticos tras varios procesos de fundición.

En la actualidad, la utilización de diversos polímeros en la elaboración de piezas de construcción va en aumento debido a que presentan una buena adherencia con la mezcla de agregados pétreos y agua y buenos resultados al someterse a pruebas mecánicas, de absorción de agua y densidad (Amariz, 2014; Yan *et al.*, 2017; Mohammadinia *et al.*, 2019).

El trabajo está organizado en cinco secciones. En la sección dos se aborda la elaboración de los prototipos y la importancia de la carbonatación, así como la metodología empleada para su medición. En la sección tres se determina el grado de carbonatación mediante el indicador colorimétrico de fenoltaleína y la medición de pH a tiempos de exposición de 16 horas. En la sección cuatro se muestran los resultados de la comparación entre tabicones modificados y convencionales, destacando que el uso del noryl como material reciclado podría ser viable en la elaboración de elementos de construcción con mejor resistencia a la carbonatación. En la última sección se presentan las limitaciones y las propuestas de trabajo para futuras investigaciones en el tema.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Elaboración de tabicones

En la elaboración de los prototipos se utilizó un molde de madera prefabricado con dimensiones interiores de 10x14x28 cm, según lo indica la normativa mexicana NMX-C-038-ONNCCE 2013 (ver Figura 1).



Figura 1: Molde para la elaboración de tabicones

Para la elaboración de los tabicones se utilizaron las proporciones obtenidas como resultado de una investigación previa, en la cual se optimizó el diseño de mezclas con el fin de obtener las mejores características físicas del prototipo (Volpi-León *et al.*, 2021). Se siguieron las proporciones 1:5:2 (cemento, agregado grueso, agregado fino respectivamente); además, se agregó el 15% de agua potable con respecto a la masa total de los agregados secos. Las partículas de Noryl fueron trituradas y tamizadas para obtener un tamaño máximo de agregado de 1/2" y un mínimo de 149 micras sustituyendo el uso de agregados pétreos finos y gruesos en 57% (ver Figura 2).



Figura 2: Diseño de mezcla

Se mezclaron manualmente las partículas de pumicita y el noryl con el cemento y el agua, posteriormente, la mezcla fue vertida en el molde en tres capas compactadas 25 veces con varilla punta de bala de 10mm de diámetro y golpeadas con mazo de neopreno para eliminar oquedades. La superficie del espécimen se terminó con enrasador de metal. Se dejaron fraguar los prototipos por 24 horas a la sombra a temperatura ambiente para ser desmoldados; se impregnaron de agua por sus cuatro caras diariamente y se cubrieron con un plástico para favorecer su proceso de curado en los primeros siete días. Permanecieron inmóviles por 28 días en los que se alcanzó su máxima resistencia (NMX-C-036-ONNCCE-2013).

### 2.2. Carbonatación

La reacción química entre el dióxido de carbono atmosférico y los componentes hidratados del cemento produce una acidificación en el concreto a la que se le conoce como carbonatación (Moreno *et al.*, 2004). Durante la carbonatación el hidróxido de calcio se convierte en carbonato de calcio y el concreto disminuye su pH (Montani, 2000). El concreto en buen estado tiene un pH con intervalos de 12 y 13 mientras que en áreas carbonatadas los valores disminuyen por debajo de los 9.5 (Catari, 2021). Al llegar a estos valores de pH, se induce la pérdida de la capa de óxido protectora y pasivante alrededor del acero propiciando la corrosión de este (Vidaud & Vidaud, 2012). Por lo anterior, es importante estudiar el efecto que tiene la exposición prolongada de los concretos modificados a condiciones ambientales.

El proceso de carbonatación depende en gran medida de la permeabilidad de la pasta de aglutinante, dado por el tipo y contenido de cemento utilizado, la relación agua/cemento

(A/C) establecida para la mezcla y su grado de hidratación, así como las condiciones ambientales a las que se exponen las piezas: la concentración de CO<sub>2</sub>, porcentaje superior al 50% de humedad relativa (HR) y la temperatura. Por ejemplo, una relación A/C alta (0.65), HR entre 50 y 70%, temperatura de 23°C y bajo grado de hidratación favorecerán el proceso de carbonatación (León *et al.*, 2015).

### 2.3. Técnicas cualitativas para medición de carbonatación

La prueba de fenolftaleína consiste en aplicar una solución de fenolftaleína (compuesto orgánico C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>) diluida al 1% en alcohol isopropílico. La solución se impregna sobre superficies de piezas de concreto previamente expuestas a condiciones atmosféricas con elevadas concentraciones de dióxido de carbono y humedad relativa (Santalla, 2012). La fenolftaleína funciona como un indicador de pH que al ser aplicado tiñe ciertas áreas de color fucsia indicando un concreto sano, mientras que, aquellas con alto grado de carbonatación, pH por debajo de 8.2, permanecen incoloras (Moreno, 2006).

Esta técnica es aplicada comúnmente debido a su fácil y rápida ejecución, es recomendable únicamente para identificar profundidades aproximadas que alcanza el proceso de carbonatación en el concreto (Vidaud & Vidaud, 2012).

## 3. Experimentación

Se adquirieron 24 tabicones comerciales y se elaboraron 24 especímenes con las especificaciones comentadas en la sección 2.1. Todos los tabicones fueron sometidos en diferentes periodos de tiempo a un ambiente agresivo dentro de una cámara de carbonatación acelerada, cuyas dimensiones son 178 cm de largo, 96 cm de alto y 120 cm de ancho con un tanque con capacidad de 25 kg de CO<sub>2</sub>. Al interior, se manejaron niveles de concentración de dióxido de carbono de 3.5 L/min y humedad relativa del 70%, la temperatura promedio al interior osciló entre los 21°C y 23°C (ver Figura 3). Los especímenes se introdujeron en posición horizontal (sobre la cara con dimensiones 10x14 cm) con periodos de exposición de 4, 8, 12 y 16 horas (ver Figura 4).

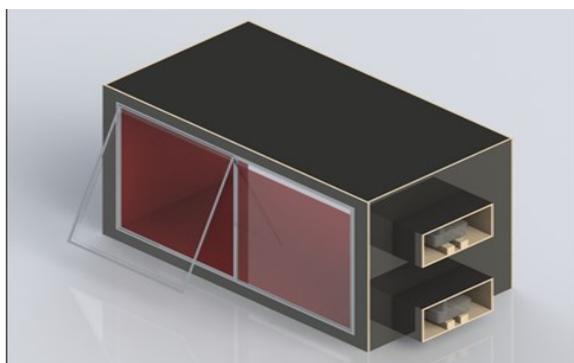


Figura 3: Cámara de carbonatación



Figura 4: Tabicones expuestos en la cámara de carbonatación

Para la ejecución de las pruebas cualitativas se consideraron dos métodos: la aplicación de fenolftaleína y la medición de pH. Los especímenes previamente expuestos a diferentes tiempos dentro de la cámara de carbonatación se dividieron para cada prueba.

### 3.1. Perfil de Carbonatación

Para la prueba de fenolftaleína se preparó la solución disolviendo 10 gramos de fenolftaleína en su presentación en polvo en un litro de alcohol isopropílico, posteriormente, se realizó un corte longitudinal a la mitad de los tabicones para dejar al descubierto su núcleo. Con la ayuda de un atomizador se impregnó la solución en las caras recién cortadas, automáticamente empezó a presentarse una coloración fucsia más o menos concentrada en cada espécimen. Con vernier se procedió a medir en cada tabicón el área carbonatada (la que no se tiñe) (ver Figura 5).

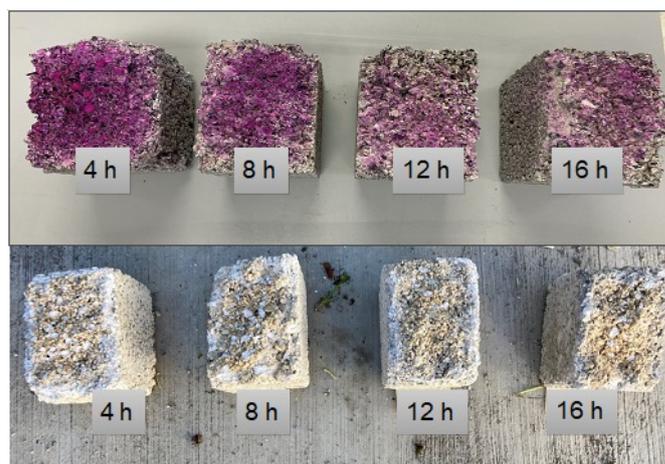


Figura 5: tabicones de noryl y tabicones comerciales, carbonatados.

### 3.2. Prueba de medición de pH

Para la medición de pH se extrajeron núcleos cuadrados de 5x5 cm de los especímenes expuestos, con ayuda de un mortero y pistilo fueron pulverizados y pesados. Para cada muestra se utilizaron 10 gr de polvo, a cada una se le agregaron 75 ml de agua desionizada, se mezcló y se dejó reposar por dos minutos (Sanjuan, 2014) (ver Figura 6). Para el muestreo se utilizó un medidor de pH marca HANNA, modelo HI 2550, se estabilizó y calibró con buffer de 4, 7, 10 y 14, se introdujo un hisopo para realizar la medición.



Figura 6: Muestras para medición de pH.

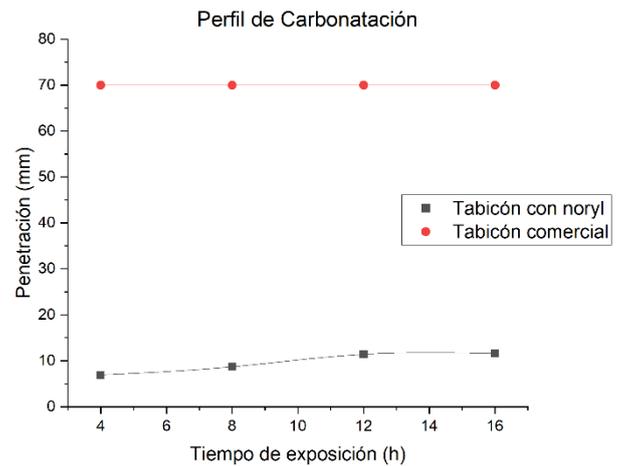
#### 4. Resultados

##### 4.1. Perfil de carbonatación

Los resultados de colorimetría con el indicador de fenolftaleína en los tabicones de noryl mostraron valores promedio entre 6.9 y 11.6 mm de profundidad de carbonatación en función del tiempo de exposición (ver Tabla 1) (ver Figura 7). La velocidad en el avance de carbonatación en los tabicones de noryl inicialmente es mayor, sucesivamente decrece; esto puede deberse a que existe mayor porosidad en áreas superficiales del elemento facilitando la entrada del CO<sub>2</sub>. En los tabicones comerciales no se observó cambio en la tinción, ya que la fenolftaleína tiene un rango de viraje de pH entre 8.2 y 10 (Moreno, 2006), se presume que la velocidad de penetración permanece constante debido a que se encuentran completamente carbonatados (ver Gráfica 1). El tiempo de exposición de los especímenes al interior de la cámara de carbonatación se limitó debido a las características de esta por tratarse de un prototipo, sin embargo, el uso de la cámara no afecta los resultados obtenidos en los especímenes, ya que fue construida en cumplimiento con la normativa ASTM-D1293, asimismo, las condiciones y tiempos de exposición de los tabicones fueron iguales.

Tabla 1. Perfil de penetración de carbonatación

Tiempo de exposición (h)	Penetración (mm)	
	Tabicones con Noryl	Tabicones comerciales
4	6.9	70
8	8.7	70
12	11.4	70
16	11.6	70



Gráfica 1. Comparativa del perfil de penetración



Figura 7: Medición de perfil de carbonatación en prototipos de noryl.

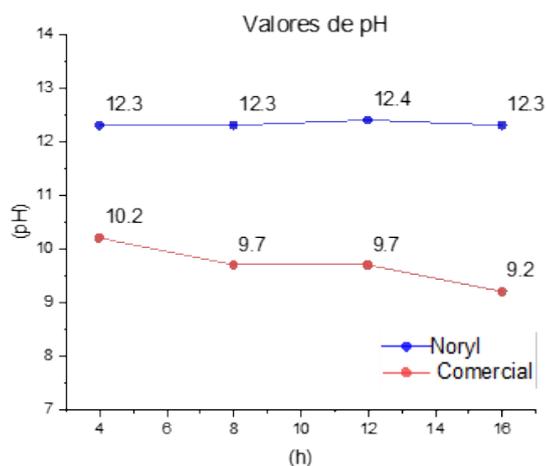
##### 4.2. Prueba de medición de pH

Para la prueba de medición de pH, los resultados mostraron que los valores promedio de los tabicones elaborados con polímero noryl expuestos tuvieron diferencias de pH mínimas entre ellos debido a los tiempos de exposición, a diferencia de los tabicones comerciales cuyo intervalo fue mayor (ver tabla 2).

Tabla 2. Valores de pH

Tiempo de exposición (h)	Tabicones de noryl	Tabicones comerciales
4	12.3	10.2
8	12.3	9.7
12	12.4	9.7
16	12.3	9.2

En la gráfica 2 se observan los valores promedio de pH de acuerdo con los tiempos de exposición de los tabicones comerciales y los fabricados con noryl, siendo los últimos los que presentan menor afectación por carbonatación, con valores promedio de pH de 12.3, lo que refiere a concretos sanos. Por otro lado, los tabicones comerciales obtuvieron valores de pH más bajos, representando mayor carbonatación. Como resultado se observó una variación significativa de pH entre los tabicones elaborados con polímero Noryl y los convencionales, complementándose con los resultados obtenidos en el perfil de carbonatación ya que a mayor carbonatación se obtienen pH's más bajos (Ver Figura 8).



Gráfica 2. Valores de pH

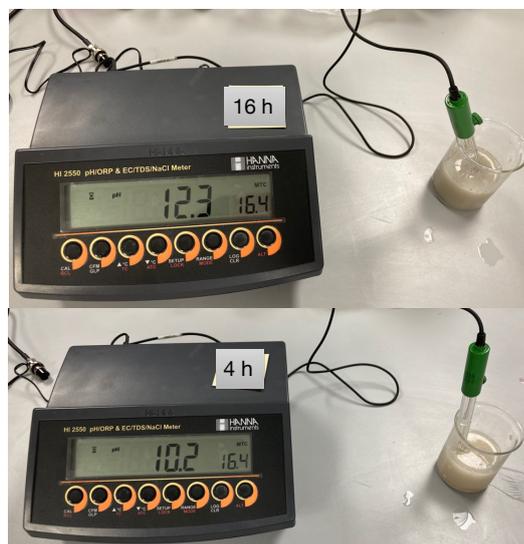


Figura 8: Medición de pH.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se realizaron pruebas de carbonatación a un conjunto de tabicones con sustitución de agregados pétreos por Noryl y tabicones comerciales con el fin de observar y comparar de forma cualitativa el daño producido por carbonatación, a través de exponerlos a un ambiente controlado dentro de una cámara de carbonatación acelerada con abundante dióxido de carbono y humedad relativa alta, la cual

simuló tales efectos atmosféricos en un periodo de tiempo total de 16 horas.

- Los resultados observados en las pruebas de fenolftaleína y medición de pH muestran que los especímenes con sustitución de agregado pétreo por noryl sufren un daño menor en el núcleo de los tabicones con respecto a las piezas comerciales, las cuales no presentaron tinción, lo que indicaría un elemento completamente carbonatado.
- La investigación destaca que el uso de los materiales de reemplazo, en este caso, el polímero noryl como sustituto parcial de agregados pétreos en la generación de tabicones para construcción, son una alternativa real en el futuro de la industria, ya que resisten en buena medida ambientes contaminantes y con elevada humedad relativa, permitiendo con ello, el reciclaje de materiales que, por sus características, actualmente solo se desechan.
- Para trabajos futuros se propone incrementar los tiempos de exposición de los especímenes al interior de la cámara de carbonatación; utilizar otros métodos aplicables a este tipo de investigación, como los indicadores colorimétricos o el método indicado por la normativa *Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces* (ASTM-D4262), para evaluar su pH, así como analizar otro tipo de elementos de construcción como tabicones de uso estructural o tabicones huecos.

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por hacer posible la realización de este proyecto, principalmente por la prestación del equipo e instalaciones para la experimentación.

## Referencias

- Amariz, A. D. M., & Jiménez, M. L. C. (2014). Diseño y fabricación de ladrillo reutilizando materiales a base de PET. *Inge Cuc*, 10(2), 76-80.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1999). ASTM D1293-18, Métodos de prueba estándar para pH de agua. ASTM International.
- Catari Falcón, N. Y. (2021). Evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el Canal del túnel-Río Asana, 2018.
- Chinè, B. C. (2019). Estudio experimental de la carbonatación del concreto. *Tecnología en Marcha*, 32(2), 68-81.
- Gómez, B., González, R., (2017). Estudio de la eficiencia de una cámara de carbonatación en elementos de concreto basándose en las normas ASTM-D1293 y UNE-EN14630 [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio Institucional.
- Hihara, L.H., Adler, R.P.I., & Latanision, R.M. (Eds.). (2013). *Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15568>
- Hussain, R., Wasim M., & Ishida T. (2010). Induced macro-cell corrosion phenomenon in the simulated repaired reinforced concrete patch. *Australian Journal of Civil Engineering*, Ch. 8, pp. 53-59.
- Lew, H. (2004). *Concreto: Material de Construcción del siglo XXI*. Construcción y Tecnología, pp. 28-42.
- León, A. L., Venegas, I. A., & Jacobo, V. H. (2015). Degradación de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con adición de carbonato de magnesio expuesto a carbonatación. *Cultura Científica y Tecnológica*, (52).
- Metalium. (2020). Plásticos especiales. *Recuperado el 31 de enero de 2022 de Metalium*: [https://metalium.mx/plasticos-especiales/noryl-en-265-\(ppo\)/NORYL](https://metalium.mx/plasticos-especiales/noryl-en-265-(ppo)/NORYL).

- 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.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, AC-Revista Construcción y Tecnología. México.
- Moreno E., Domínguez G., Cob J., Duarte F. (2004), "Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración". *Ingeniería*, núm. mayo-agosto, pp. 117-130.
- Moreno, E. I. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería*, 10(3), 5-12.
- ONNCCE. (2013). 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.
- ONNCCE. (2014). NMX-C-038-ONNCCE-2013, Industria de la construcción-Mampostería - Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo Mexico, D.F.: Norma Mexicana.
- Otero Huerta, E. (2001). *Corrosión y degradación de los materiales*. Síntesis, México
- SABIC. (2022). Noryl Resin. 02/02/2022, de SABIC Sitio web: <https://www.sabic.com/en/products/specialties/noryl-resins/noryl-resin>
- Sanjuan Fernández, C. (2014). Carbonatación a fondo (3) Ensayo y determinación 1 de 2. Recuperado el 2017, de Patología y rehabilitación en construcción: <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/05/carbonatacion-fondo-3-ensayo-y-determinacion-1-de-2/>
- Santalla Blanco, L. M. (2012). La prueba de la fenolftaleína. Recuperado el 2017, de <http://teoriadeconstruccion.net/blog/la-prueba-de-la-fenolftaleina/>
- Vidaud, E., & Vidaud, I. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado. *Construcción y tecnología en concreto*. Pág, 21-23.
- Volpi-León, V., Ortiz-Quiroga, C. H., Seck-Tuoh-Mora, J. C., & Medina-Marín, J. (2021). Metodología basada en técnicas físicas y computacionales para la optimización de un tabicón elaborado con desecho industrial. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*.
- 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.