

# Evaluation of Accelerated Carbonation of High Strength Concrete with Anodic Manganese Dioxide Nanoparticles

*Abstract– The study evaluated the effect of nanoparticles of anodic manganese dioxide (NDMA) on the carbonation of high strength concrete. Nine mix designs were carried out with NDMA replacing 0, 5 and 10 % of the cement, and water/cement ratios of 0.40, 0.45 and 0.50. A total of 171 cylindrical specimens were produced, of which 135 were tested for compressive strength at ages of 7, 14, 28, 56 and 90 days, and 36 specimens for accelerated carbonation tests, for which a carbonation chamber was designed according to ASTM B117 specifications. The results showed that the compressive strength increased up to 11% for the 0.40 w/c concrete with 10% NDMA, while for w/c=0.45 and 0.50 with NDMA, it decreased by an average of 10%. The carbonation values obtained in the NDMA concrete in all cases were much lower than those of the control concrete, and the values obtained were close to 3 mm/year<sup>0.5</sup>, indicating an improvement in the quality of the NDMA concrete. Finally, the potential of NDMA as an admixture to reduce the carbonation attack of reinforced concrete was demonstrated.*

*Keywords– Nanoparticles, manganese, compression, accelerated carbonation, concrete.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Evaluación de la Carbonatación del Concreto de Alta Resistencia con adición de Nanopartículas de Dióxido de Manganeso Anódico

Ana V. Torre Carrillo, Dra<sup>1</sup>, Luisa Shuan Lucas, MSc<sup>2</sup>, Yilmar J. Herrera Saenz, BSc<sup>3</sup>, Sorin G. Ramirez Curi, Estudiante<sup>4</sup> and Noe A. Cortez Gonzales, Estudiante<sup>5</sup>.  
<sup>1</sup>National University of Engineering, Peru, anatorre@uni.edu.pe  
<sup>2</sup>National University of Engineering, Peru, lshuan@uni.edu.pe  
<sup>3</sup>National University of Engineering, Peru, yherreras@uni.pe  
<sup>4</sup>National University of Engineering, Peru, noe.cortez.g@uni.pe  
<sup>5</sup>National University of Engineering, Peru, sorin.ramirez.c@uni.pe

**Abstract:** El estudio evaluó el efecto de las nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en la carbonatación del concreto de alta resistencia. Se realizaron nueve diseños de mezcla con sustitución de 0, 5 y 10 % del cemento por NDMA, y relaciones agua/cemento de 0.40, 0.45 y 0.50. Se elaboraron 171 especímenes cilíndricos, de los cuales 135 se sometieron a ensayos de resistencia a la compresión a edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días, y 36 especímenes para pruebas de carbonatación acelerada, para lo cual se diseñó una cámara de carbonatación de acuerdo con las especificaciones del ASTM B117. Los resultados mostraron que la resistencia a compresión se incrementó hasta un 11% para el concreto de a/c de 0.40 con 10% NDMA, mientras que para a/c=0.45 y 0.50 con NDMA, disminuyó en promedio 10%. Los valores de carbonatación obtenidos en los concretos con NDMA en todos los casos fueron mucho menores que los del concreto de control, y los valores obtenidos fueron cercanos a 3 mm/año<sup>0.5</sup>, lo que indica mejor desempeño frente al ataque por carbonatación y una mejora en la calidad del concreto con NDMA. Finalmente, se demostró el potencial de las NDMA, como una adición para reducir el ataque por carbonatación del concreto armado.

**Palabras Clave—**Nanopartículas, manganeso, compresión, carbonatación acelerada, concreto.

## I. INTRODUCCIÓN

En el diseño de una estructura de hormigón de alta resistencia es importante considerar, además de la resistencia mecánica adecuada, la durabilidad frente a cualquier proceso químico, físico o biológico que tienda a dañarlo durante la vida útil de la estructura [1][2][3]. Actualmente, se están estudiando enfoques económicos contra la degradación al medio ambiente y a su vez proteger al concreto tales como: el uso de bajas relaciones agua/cemento, (a/c), el uso de inhibidores de corrosión o sistemas de protección catódica, el tratamiento de superficies de hormigón [4][5][6] y el curado por carbonatación que mejora de resistencia a la compresión, sin embargo, acelerando la carbonatación del concreto [7][8].

La carbonatación es uno de los principales mecanismos de deterioro del hormigón armado [9] debido a la neutralización de la pasta de cemento y posteriormente la corrosión del acero de refuerzo [10][11]. En condiciones adecuadas cuando el acero se incrusta en un concreto denso de buena calidad, se rodea de

una matriz de cemento hidratado que contiene electrolito poroso con un valor de pH típico en el rango 13-14 [12]. Sin embargo, el principal agente de la carbonatación es el CO<sub>2</sub> de la atmósfera [9] puede penetrar los poros del hormigón y reaccionar con el hidróxido de calcio generando el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) [3][11], que luego reduce progresivamente la alcalinidad del hormigón o la pasta de cemento [9]. Además, durante la carbonatación, el CO<sub>2</sub> puede reaccionar con el gel del Silicato Cálcico Hidratado formado durante la hidratación del cemento, donde el gel se descalcifica y también forma CaCO<sub>3</sub>, el cual afecta la durabilidad del hormigón. [13] Si el valor de pH del hormigón alcanza 9,5 o menos, la alcalinidad del medio es insuficiente e inestable para mantener pasiva la película de óxido del acero de refuerzo, cuya función es actuar como barrera a la disolución anódica del metal, permitiendo que el acero se corroa a un ritmo determinado principalmente por la conductividad electrolítica del material carbonatado [12]. Por lo tanto, bajo la acción de la humedad y del oxígeno, se puede iniciar un proceso de corrosión del acero que conduce a que el hormigón sea propenso a desarrollar una corrosión generalizada [1] y reducir su resistencia a la compresión. Cuando se produce carbonatación, el pH disminuye, aumentando así la vulnerabilidad a la corrosión de las barras de refuerzo incrustadas. Entre los factores que influyen están: el tiempo que los morteros están expuestos a la presión parcial de CO<sub>2</sub>, la humedad, la porosidad del mortero, las fisuras previas, etc. Evidentemente la composición de conglomerante cementoso también es un punto clave para determinar el efecto y la velocidad del proceso de carbonatación [14][15].

Entre los tratamientos de superficie comúnmente utilizados, los recubrimientos poliméricos generalmente pueden proporcionar una protección más efectiva al concreto contra la carbonatación que los recubrimientos cementosos o los tratamientos hidrofóbicos [4].

Por lo tanto, para garantizar un adecuado comportamiento del concreto de alta resistencia frente a la carbonatación, es necesario buscar soluciones entre ellas el uso de nano materiales. Los nanomateriales han recibido recientemente mucha atención debido a sus propiedades funcionales únicas para mejorar las propiedades de durabilidad y resistencia

[9][16][17]. Además, también mejoran la impermeabilidad de la microestructura y densifican la matriz, prolongar su vida útil [2]. Esto puede aumentar la resistencia al ataque de cloruro, carbonatación y otros mecanismos de deterioro [18].

Diversas investigaciones emplearon nanomateriales para mejorar eficazmente la resistencia a la carbonatación [4] y al cloruro del concreto. Se incorporaron nanopartículas tales como la nano-SiO<sub>2</sub> [2][4], nano-TiO<sub>2</sub> [9][19], nano-CaCO<sub>3</sub> [19] y nano-MgO [20] con diversas aplicaciones como: recubrimientos orgánicos o pinturas a base de agua [9][4] a fin de mejorar efectivamente la densidad del recubrimiento y a su vez la resistencia a la carbonatación y al cloruro del concreto recubierto, se concluye que el efecto de mejora de nano-TiO<sub>2</sub> es superior al del nano-SiO<sub>2</sub> [9]. Con la adición de nano-SiO<sub>2</sub> de revestimientos del concreto en base cloro caucho, resina epoxi y poliuretano la vida útil se puede alargar en un 78% [4]. Entre otros, como los nanotubos de carbono [2][21] y hormigón con geo polímeros [18] en base a cenizas volantes y escoras de alto horno [22] que también mejoran la resistencia a la compresión, la porosidad y a la carbonatación. En [23], se encontró que el tratamiento superficial del hormigón con nano silano-arcilla exhibía propiedades impermeables y una mejor resistencia contra iones cloruro, porque el tratamiento es capaz de modificar la microestructura de la superficie del hormigón.

No obstante, es necesario estudiar los procesos de carbonatación en el concreto con nanopartículas, sin embargo, debido a que la carbonatación atmosférica natural es un proceso lento, controlado por difusión, que puede tardar muchos años en penetrar a través de un espesor típico de recubrimiento de concreto aplicado al acero de refuerzo [1], siendo la aceleración de la velocidad de carbonatación un tema complicado[5], para ello los estudios de laboratorio de la corrosión inducida por carbonatación a menudo se llevan a cabo con muestras sometidas a alguna forma de carbonatación acelerada [12][24][25]. Esto comúnmente implica exponer el concreto a una atmósfera con alta concentración de CO<sub>2</sub> y humedad relativa en el rango de 50 a 80%, controlada por medio de una solución salina saturada [12]. Además, otros autores mencionan que no se observa una correlación notable entre la tasa de carbonatación y los parámetros medidos del concreto [26].

Por ello, el objetivo de esta investigación es evaluar la resistencia a la carbonatación del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) mediante el acondicionamiento de una cámara de carbonatación acelerada y determinar el uso potencial del NDMA para incrementar la durabilidad del concreto. Esta investigación es de gran importancia para enriquecer y mejorar la teoría de la durabilidad del concreto con nanopartículas y ampliar la aplicación de estos nanomateriales como protección frente a la carbonatación de estructuras.

## II. METODOLOGÍA

### A. Materiales

#### A1. Cemento

El aglomerante utilizado fue cemento Portland tipo I, que cumple ASTM C150.

#### A2. Agregados

Las características de los agregados utilizados, se presentan en la TABLA I.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Agregados	Fino	Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1650	1392
Peso Unitario Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1883	1572
Peso Especifico (kg/m <sup>3</sup> )	2639	2718
Módulo de Fineza	2.50	6.54
Tamaño Máximo Nominal (TMN)		1/2"
Absorción (%)	0.82	1.71
Humedad (%)	1.09	0.41

#### A3. Aditivo

El aditivo empleado fue un superplastificante que cumple con la clasificación TIPO F – Aditivo Reductor de Agua.

#### A4. Nanopartículas

Las NDMA utilizadas fueron obtenidas como subproducto del proceso de refinación del zinc. Tuvieron un tamaño promedio de partícula de 42,4 nm y un contenido de humedad del 27,91% [27]. La composición química de la muestra de NDMA se determinó mediante difractorómetro de rayos X, y los resultados se presentan en la Tabla II.

TABLA II  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NDMA

Componente	% Total	O	S	Mn	Pb
Anglesita	5.60	21.10	10.57	0.00	68.32
MnO <sub>2</sub>	94.40	36.81	0.00	63.19	0.00
<b>Peso Total</b>	100	35.93	0.59	59.65	3.83

#### A5. Concreto

Se diseñaron nueve tipos de mezclas para tres a/c (0.40, 0.45 y 0.50) con contenidos de NDMA de 0, 5 y 10%, utilizando el método de Bolomey para mezclas de consistencia fluida. Las dosificaciones utilizadas se detallan en la Tabla III.

TABLA III  
DOSIFICACIONES EN PESOS (KG) DE MATERIALES PARA 1 M<sup>3</sup> DE CONCRETO

a/c	%NDMA	C	NDMA	Agua	Arena	Piedra	ADITIVO
0.40	0	513	0	196	901	735	6.16
	5	487	25.7	196	901	735	6.16
	10	461	51.3	196	901	735	6.16
0.45	0	456	0	196	901	791	5.0
	5	433	22.8	196	901	791	5.0
	10	410	45.6	196	901	791	5.0
0.50	0	415	0	198	901	823	4.15
	5	394	21	198	901	823	4.15
	10	373	42	198	901	823	4.15

## B. Métodos

### B1. Preparación de las muestras de concreto

Se fabricaron un total de 171 muestras cilíndricas de 4" x 8". Estas muestras fueron desmoldadas a las 24 horas y posteriormente sometidas a un proceso de curado, donde se sumergieron en agua a una temperatura de  $20 \pm 0,5$  °C hasta el inicio de las pruebas correspondientes. Para el ensayo de carbonatación acelerada se seleccionaron 4 muestras, mientras que para el ensayo de compresión se utilizaron 3 muestras (para cada edad de ensayo)

### B2. Acondicionamiento de la cámara para carbonatación acelerada

La cámara se diseñó para acelerar la carbonatación del concreto de acuerdo con la norma ASTM B117, que se aplica a cámaras de niebla salina [12]. La cámara tiene una capacidad para albergar seis especímenes de concreto, que ocupan un volumen aproximado de 9425 cm<sup>3</sup>. Las dimensiones de la cámara fueron de 40x30x50 cm (60000cm<sup>3</sup>). Según la norma ASTM B117, el volumen ocupado por el gas no debe ser menor de 2,5 veces el volumen del sólido, por lo que la cámara no debe tener un volumen total inferior a 23562 cm<sup>3</sup>. La impermeabilidad de la cámara se garantizó mediante el uso de selladores epóxicos. El abastecimiento de aire comprimido a una presión constante de operación estuvo en el rango de valores de 1 atm. El flujo del aire para las condiciones de presión fue de 10 mL/min, con una humedad relativa del  $75\% \pm 5\%$  y un  $6\% \pm 0,5\%$  de CO<sub>2</sub> dentro de la cámara. En la fig.1 se muestra un esquema de los componentes de la cámara de carbonatación acelerada.

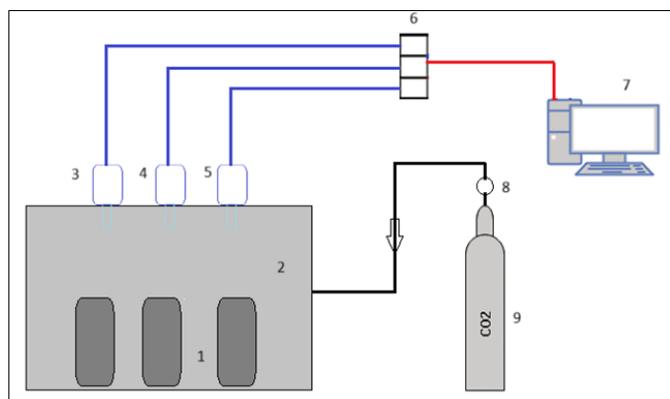


Fig. 1. Componentes de la cámara de carbonatación acelerada

En la Fig. 1 se esquematizan los componentes de la cámara de carbonatación : (1) Probetas 4"x8", (2) Cámara de carbonatación, (3) sensor de temperatura, (4) sensor de presión, (5) sensor de CO<sub>2</sub>, (6) Equipo PASCO 850, (7) Computador, (8) Regulador de Presión y válvula de control de flujo y (9) Balón de gas CO<sub>2</sub>.

### B3. Ensayo de Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto se midió a los 28 días de acuerdo con ASTM C109, este método de ensayo consiste en aplicar una carga uniaxial en compresión a una velocidad constante ( $0.25 \pm 0.05$  Mpa/s).

### B4. Ensayo de carbonatación acelerada.

Después de 28 días de curado, las muestras fueron retiradas y secadas en un horno a 105°C durante 6 horas hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, las muestras fueron transferidas a la cámara de carbonatación acelerada como se puede apreciar en la Fig. 2, donde permanecieron durante 7 días, asegurando una concentración constante de 6% de CO<sub>2</sub>. Al finalizar este período, se comprimió diametralmente las muestras y se midió la profundidad de carbonatación, utilizando el método de coloración en una solución al 1% de fenolftaleína. Se roció la solución sobre la superficie del concreto que muestra un cambio de color dependiendo del factor de pH. La medición de profundidad de penetración de CO<sub>2</sub> se realizó en al menos 15 puntos de la zona carbonatada.

Los indicadores de PH recientemente desarrollados son sensibles y aplicables para determinar la carbonatación del cemento tanto natural como acelerada [28].



Fig. 2 Muestras en proceso de carbonatación acelerada

### 2.2.4 Potencial de Hidrogeno

En las zonas donde se observó ninguna coloración representa la región carbonatada utilizando esta parte carbonatada de las muestras se pulverizo y midió el PH. utilizando el medidor portátil de PH OHAUS ST20

## III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### A. Resistencia a la compresión

En la tabla IV, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a las edades de curado de 7, 14, 28, 56 y 90

días. La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto con a/c de 0.40 con NDMA (5 y 10%) en todos los casos incrementaron. Mientras que para a/c= 0.45 y 0.50 disminuyeron en promedio 10%.

TABLA IV  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN KG/CM<sup>2</sup> DEL CONCRETO KG/CM<sup>2</sup>

a/c	Edad días	Patrón	5%	10%
0.40	7	596	597	622
0.40	14	622	636	665
0.40	28	645	648	724
0.40	56	683	702	761
0.40	90	734	766	777
0.45	7	521	506	463
0.45	14	529	539	507
0.45	28	629	583	534
0.45	56	691	619	601
0.45	90	698	621	603
0.50	7	501	404	426
0.50	14	527	462	479
0.50	28	570	489	493
0.50	56	592	507	513
0.50	90	598	527	526

En la Fig. 3 ; se aprecia como la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de curado disminuye al aumentar la relación agua-cemento y aumenta con la adición de NDMA. La máxima resistencia a la compresión se logra con una relación agua-cemento de 0.40 y un contenido de NDMA del 10%, siendo un 6% mayor que la resistencia del concreto patrón

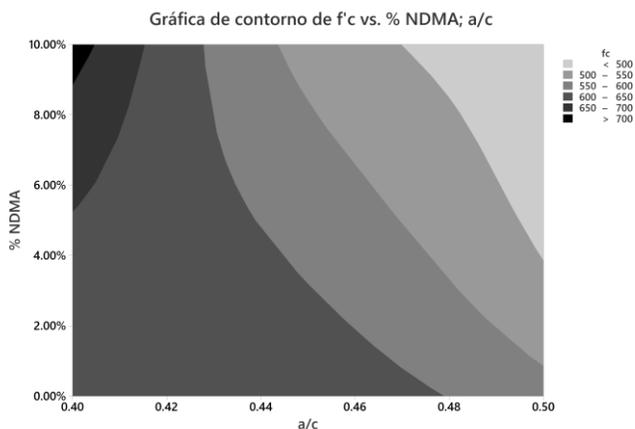


Fig. 3. Gráfica de contorno de la resistencia a la compresión a 28 días

### B. Resistencia a la carbonatación

En la TABLA V , se presentan los valores promedio de carbonatación correspondientes al promedio de 15 mediciones realizadas en diferentes lugares de los bordes laterales de la superficie de las muestras. Se encontró que el concreto de control tenía una profundidad de carbonatación mayor entre todas las mezclas en cada período de exposición [29] para todas las relaciones a/c. asimismo para a/c= 0.50 el concreto de control se carbonato 40% más que las muestras con NDMA

La reducción de la profundidad de carbonatación del concreto con NDMA se atribuye a la densificación de la microestructura que dificulta el movimiento o difusión del CO<sub>2</sub> debido a la incorporación de nanomateriales [26][29] con un comportamiento similar a la nano-SiO<sub>2</sub> [4], nano-TiO<sub>2</sub> y nano-CaCO<sub>3</sub> [19]. Además, resaltar la influencia de la estructura de los poros sobre la tasa de carbonatación del concreto [26].

TABLA V  
PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y PH DEL CONCRETO ENDURECIDO

	Profundidad de carbonatación y PH					
	a/c=0.40		a/c=0.45		a/c=0.50	
	mm	PH	mm	PH	mm	PH
Patrón	8	9.5	9	9.07	10	9.01
5% NDMA	7	10.25	6.9	10.59	6.0	9.90
10% NDMA	7	10.24	6.8	10.36	6.7	10.34

Utilizando los datos de la tabla V, calculamos el coeficiente de carbonatación acelerada (K<sub>acel</sub>), que representa la velocidad de avance del CO<sub>2</sub>, en el medio continuo (Concreto), utilizando la ecuación básica de difusión de la ley de Fick, donde X es la profundidad (mm), T el tiempo (años) .

$$X = K\sqrt{t} \tag{1}$$

Considerando una concentración del 0.03% de CO<sub>2</sub> en un ambiente natural; y que la concentración de CO<sub>2</sub> usada en la cámara de carbonatación acelerada fue de 6%; es decir 200 veces mayor que la concentración en condiciones ambientales promedio se puede concluir que a 7 días en ambiente acelerado se obtiene aproximadamente el cuádruple de carbonatación que se alcanzaría en condiciones normales (200/52), los resultados muestran en la tabla VI.

TABLA VI  
COEFICIENTES DE CARBONATACIÓN ACELERADA

	Coeficiente de carbonatación (K <sub>acel</sub> ) mm/año <sup>0.5</sup>					
	(a/c=0.40)		(a/c=0.45)		(a/c=0.50)	
	[mm]	K <sub>acel</sub>	[mm]	k <sub>acel</sub>	[mm]	k <sub>acel</sub>
Patrón	8	57.77	9	64.99	10	72
5% NDMA	7	50.55	6.9	49.82	6.0	43.33
10% NDMA	7	50.55	6.8	<b>49.10</b>	6.7	48.4

Para convertir este coeficiente obtenido como K<sub>acelerado</sub> a K<sub>ambiental</sub>, se usó la 2da ecuación de Fick,

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \tag{2}$$

Donde K1 y K2 son los coeficientes de carbonatación para distintas concentraciones de CO<sub>2</sub>; C1 y C2 son las concentraciones de CO<sub>2</sub> usadas (en condiciones naturales al medio ambiente y condición acelerada), los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla VII.

TABLA VII  
COEFICIENTES DE CARBONATACIÓN AL AMBIENTE

Tipo de concreto	Coeficiente de carbonatación mm/año <sup>0.5</sup>					
	(a/c=0.40)		(a/c=0.45)		(a/c=0.50)	
	Kacel	Kam	Kacel	kam	Kacel	kamb
Patrón	57.77	4.085	64.99	4.595	72	5.09
5% NDMA	50.55	3.057	49.82	3.22	43.33	3.06
10% NDMA	50.55	3.074	49.10	3.27	48.4	3.32

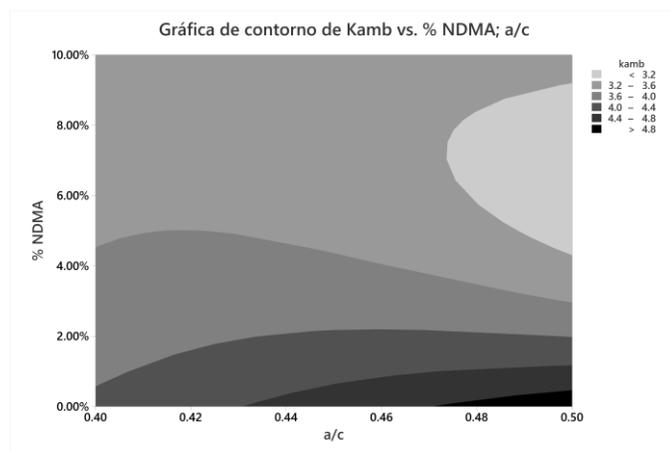


Fig. 4. Determinación del Kamb para diferentes a/c y % de NDMA

Como se observa en la fig.4, los coeficientes de carbonatación en condiciones medio ambientales en los concretos NDMA, son menores en todos los casos con respecto al concreto de control. Por lo que se puede notar la influencia del NDMA y la relación a/c en la velocidad de carbonatación.

Los parámetros influyentes son el contenido de agua, la relación a/c y la adición de materiales adicionales [11].

Según investigadores como Alonso y Andrade (1993) han sugerido que, en un hormigón de calidad regular, el coeficiente de carbonatación tendría un valor entre 3 y 6 mm / año<sup>0,5</sup> de tal forma que un hormigón de alta calidad presentaría un valor menor de 3 mm / año<sup>0,5</sup> y un hormigón de baja calidad presentaría un valor de más de 6 mm/año<sup>0,5</sup>

Como se puede observar en esta investigación los valores obtenidos de coeficientes de carbonatación con NDMA están entre 3.0 y 3.57 mm/año<sup>0.5</sup> que equivale a un hormigón de alta calidad.

#### IV. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos se plantean las siguientes conclusiones:

- (1) En todos los casos, los coeficientes de carbonatación obtenidos en los concretos con NDMA fueron menores que los del concreto de control, y los valores obtenidos fueron cercanos a  $K_{amb}=3$ . Esto demuestra una mejora en la calidad del concreto por efecto de las NDMA.
- (2) A partir de los 56 días la resistencia a la compresión en las muestras con 5 y 10% de NDM se mantiene constante.
- (3) Los diseños con NDM y a/c =0.40, en todas las edades de control superan hasta 11% la resistencia a la compresión
- (4) La aplicación de NDMA mejoro en todos los casos la resistencia a la carbonatación del concreto, en comparación con el concreto patrón.
- (5) Mediante los coeficientes de carbonatación acelerada se demuestra que el NDM, reduce como máximo en un 40% la velocidad de carbonatación.
- (6) La adición de NDMA no afectó la alcalinidad del concreto que se mantuvo en promedio igual a 12.

#### ACKNOWLEDGMENT

Esta investigación contó con el apoyo del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería civil y del Vicerrectorado de investigación. de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Asimismo, los autores agradecen las facilidades para realizar los ensayos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNI.

#### REFERENCES

- [1] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, and E. Sánchez-Espinosa, "Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 93–103, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100.
- [2] M. Thanmanaservi and V. Ramasamy, "A study on durability characteristics of nano-concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 2360–2365, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.349.
- [3] V. Rostami, Y. Shao, A. J. Boyd, and Z. He, "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 1, pp. 186–193, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.09.010.
- [4] G. Li, W. Hu, H. Cui, and J. Zhou, "Long-term effectiveness of carbonation resistance of concrete treated with nano-SiO<sub>2</sub> modified polymer coatings," *Construction and Building Materials*, vol. 201, pp. 623–630, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.004.
- [5] R.B. Polder, W.H. A. Peelen, B.J. Th. Stoop, E.A. C. Neeft, Early stage beneficial effects of cathodic protection in concrete structures, (n.d.). <https://doi.org/10.1002/maco.201005803>.
- [6] S. Teng, T.Y.D. Lim, B. Sabet Divsholi, Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag, *Constr Build Mater* 40 (2013) 875–881, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.052>.
- [7] K. Wi, K. Wang, J. Han, H.-S. Lee, and S.-J. Lim, "Effects of nano palm oil fuel ash on hydration of cement under the accelerated carbonation curing," *Materials Letters*, vol. 327, p. 132935, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.132935.
- [8] M. G. Sohail, R. Kahraman, N. Al-Nuaimi, B. Gencturk, and W. Alnahhal, "Durability characteristics of high and ultra-high-performance concretes," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101669, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101669.
- [9] H. Qu et al., "Enhancing the carbonation and chloride resistance of concrete by nano-modified eco-friendly water-based organic coatings," *Materials Today Communications*, vol. 37, p. 107284, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107284.
- [10] D. Linares & M. Sánchez (2003). Construcción, Operación Y Puesta En Funcionamiento De Una Cámara Para Carbonatación Acelerada. *Revista*

- Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 26(1), 34-44. Recuperado en 13 de enero de 2024, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702003000100006&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702003000100006&lng=es&tlng=es).
- [11] D. Wang and J. Xiao, "Strategies to accelerate CO<sub>2</sub> sequestration of cement-based materials and their application prospects," *Construction and Building Materials*, vol. 314, p. 125646, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125646.
- [12] D. J. Anstice, C. Page, and M. M. Page, "The pore solution phase of carbonated cement pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 2, pp. 377–383, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.041.
- [13] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317522000450>
- [14] A. Bautista, S.M. Alvarez, E.C. Paredes, F. Velasco, S. Guzman, Corrugated stainless steels embedded in carbonated mortars with and without chlorides: 9-year corrosion results, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 186–196, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.099>.
- [15] C.Q. Lye, R.K. Dhir, G.S. Ghataora, Carbonation resistance of fly ash concrete, *Mag. Concr. Res.* 67 (2015) 1150–1178, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.15.00204>.
- [16] A.M. Rashad, A synopsis about the effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and nano-clay on some properties of cementitious materials – a short guide for Civil Engineer, *Mater. Des.* 52 (2013) 143–157, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.035>.
- [17] R. Bani Ardalan, A. Joshaghani, R.D. Hooton, Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 134 (2017) 116–122, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.090>.
- [18] N. Farzadnia and C. Shi, "Use of nanomaterials in geopolymers," in Elsevier eBooks, 2023, pp. 161–190. doi: 10.1016/b978-0-12-817832-4.00003-1.
- [19] D. Ramachandran, S. Uthaman, and V. Vishwakarma, "Studies of carbonation process in nanoparticles modified fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 252, p. 119127, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119127.
- [20] R. Hay, N. T. Dũng, A. Lesimple, C. Unluer, and K. Çelik, "Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 118, p. 103955, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103955.
- [21] A. Carriço, J. A. Bogas, A. Hawreen, and M. Guedes, "Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 121–133, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221.
- [22] Z. Li and S. Li, "Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 668–680, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.127.
- [23] C.K.Y. Leung, M. Asce, H.-G. Zhu, ; Jang-Kyo Kim, R.S.C. Woo, Use of Polymer/Organoclay Nanocomposite Surface Treatment as Water/Ion Barrier for Concrete, (n.d.). <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200820:7484>.
- [24] B. Chinè-Polito, R. Cuevas-Kauffmann, R. Jiménez-Salas, and G. Ortiz-Quesada, "Estudio experimental de la carbonatación del concreto," *Tecnología En Marcha*, May 2019, doi: 10.18845/tm.v32i2.4350.
- [25] A. A. Ramezani-pour, S. Ghahari, and M. Esmaeili, "Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 58, pp. 138–146, May 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.102.
- [26] V. Shah, J. R. Mackechnie, and A. Scott, "Determination of carbonation resistance of concrete through a combination of cement content and tortuosity," *Journal of Building Engineering*, vol. 60, p. 105176, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105176.
- [27] A. Torre, B. Dorival, O. Avalo, and Y. Herrera, "Characterization of Manganese Dioxide nanoparticles for reuse as a partial replacement of cement in concrete," *IEEE*, Oct. 2023, doi: 10.1109/coniiti61170.2023.10324101.
- [28] N. Du, R. Guan, and P. Hou, "New fluorescent pH indicators for characterizing cement carbonation," *Construction and Building Materials*, vol. 388, p. 131662, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131662.
- [29] R. Sharma and R. A. Khan, "Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self-compacting concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 1171–1186, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.029.
- [30] R. Hay, J. Li, and K. Çelik, "Phase evolution, micromechanical properties, and morphology of calcium (alumino)silicate hydrates C-(A)-S-H under carbonation," *Cement and Concrete Research*, vol. 152, p. 106683, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106683.
- [31] D.W. Hobbs, B.K. Marsh, J.D. Matthews, S. Petit, Minimum requirements for concrete to resist carbonation-induced corrosion, in: D.W. Hobbs (Ed.), *Minimum Requirements for Durable Concrete*, BCA, Crowthorne, 1998, pp. 11 – 42.
- [32] V. Snowlin, H.J. Prabu, A.F. Sahayaraj, I. Johnson, E. Thaninayagam, R.R. Gopi, J. Salamon, A. Simi, Solar assisted removal of methylene blue dye from wastewater using zinc-metal organic framework (Zn-mof), *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* (2023), <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02823-5>.
- [33] A. Felix Sahayaraj, H. Joy Prabu, J. Maniraj, M. Kannan, M. Bharathi, P. Diwahar, J. Salamon, Metal-organic frameworks (MOFs): the next generation of materials for catalysis, gas storage, and separation, *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* 33 (2023) 1757–1781, <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02657-1>.
- [34] J. Maniraj, F.S. Arockiasamy, C.R. Kumar, D.A. Kumar, I. Jenish, I. Suyambulingam, S.M. Rangappa, S. Siengchin, Machine learning techniques for the design and optimization of polymer composites: a review, *E3S Web of Conferences*. 428 (2023), 02013, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342802013>.
- [35] A.F. Sahayaraj, S. Dhamotharan, D. Sandeep, P. Ramachandran, I. Jenish, D. Divakaran, I. Suyambulingam, M.R. Sanjay, S. Siengchin, Sustainable smart polymer composite materials: a comprehensive review, *E3S Web of Conferences*. 428 (2023), 02014, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342802014>.
- [36] "Comportamiento de columnas de tubos de acero reforzados con hormigón reforzado con hormigón a base de nanomateriales sometidos a compresión axial". [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423010992>