

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

DURABILIDAD DE HORMIGONES ELABORADOS CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO Y PUZOLÁNICOS MEDIANTE EL ENSAYO ACELERADO EN CÁMARA DE CARBONATACIÓN INFLUENCIA DEL TIEMPO DE CURADO

DURABILITY OF CONCRETE ELABORATED WITH ORDINARY PORTLAND CEMENT AND POZZOLANS THROUGH ACCELERATED TEST IN CARBONATION CHAMBER. INFLUENCE OF CURING TIME

Abel Castañeda Valdés^{a,*} (0000-0002-2531-9224)
Reneilder Martínez Domínguez^b (0009-0007-9583-7741)

^{a,*} Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC, Avenida 25, Esquina 21-A, No. 15202, Cubanacán, Playa, La Habana, Cuba. Código Postal 11608.

^b Escuela Interarmas de las FAR, General "Antonio Maceo". Ceiba del Agua, Caimito, Artemisa, Cuba. Código Postal 10699.

^{a,*} abel.castaneda@cnic.edu.cu

Recibido: 12 de febrero de 2026;

Aceptado: 16 de marzo de 2026;

RESUMEN

La durabilidad de hormigones elaborados con cemento portland ordinario y puzolánicos mediante el ensayo acelerado en cámara de carbonatación fue evaluada, como objetivo general del estudio. La influencia del tiempo de curado fue demostrada. Caracterizar el hormigón antes de exponerlo al ensayo acelerado. Comparar la resistencia a la carbonatación en los diferentes tipos de hormigón usados expuestos al ensayo acelerado a diferentes tiempos de curado y exposición. Demostrar los factores influyentes en la carbonatación, proponiendo una variante de determinación de la constante de carbonatación, fueron los objetivos específicos. Probetas cilíndricas de relaciones agua/cemento 0,4 y 0,55 de cuatro tipos de hormigón P35(0,4), PP35(0,4), PP35(0,4) y PP35(0,55) fueron elaboradas con cemento portland ordinario P35 y puzolánicos PP35. La importancia de someter el hormigón a tiempos de curados de 28 días fue confirmada, principalmente a inmersión completa en agua a temperatura ambiente. Para garantizar plazos elevados de vida útil de proyecto en las estructuras que se pretenden construir, la resistencia a la compresión resultó el factor más influyente en la durabilidad del hormigón, teniendo en cuenta el porcentaje de porosidad capilar efectivo. Los dos tipos de hormigón P35(0,4) y PP35(0,4) fueron los más durables expuestos. The durability of concrete elaborated with ordinary Portland cement and pozzolans was evaluated using the accelerated carbonation chamber test, as the general objective of the study. The influence of curing time was demonstrated. To characterize the concrete before exposed to the accelerated test. To compare the carbonation resistance of different types of concrete used exposed to accelerated test at different curing times and exposure times. To demonstrate the factors influencing carbonation, proposing a variant for the carbonation constant determination, were the specific objectives. Cylindrical probes with water/cement ratios of 0.4 and 0.55 of four types of concrete P35(0.4), PP35(0.4), PP35(0.4) and PP35(0.55) were elaborated with ordinary Portland cement P35 and pozzolans PP35. The importance of subjecting concrete to curing times of 28 days was confirmed, primarily by complete immersion in water at room temperature. To guarantee long project service life in the structures to be built, compressive strength was the most influential factor in the durability of concrete, taking into account the percentage of effective capillary porosity. The two types of concrete P35(0.4) and PP 35(0.4) were the most durable exposed to the accelerated test based on

al ensayo acelerado a partir de las mediciones de la profundidad de carbonatación (X_c). Con relación al primero, los resultados fueron confirmados con los obtenidos en una estructura construida con un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 similar, expuesta al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera en Cuba. Se continúa demostrando, que el tipo de hormigón elaborado con el cemento puzolánico PP-35(0,4) además de garantizar también plazos elevados de vida útil de proyecto a las estructuras que se pretenden construir, asegura un impacto económico y ambiental positivo. Una variante de determinación de la constante de carbonatación $k\text{-mm/días}$ en el ensayo acelerado en la cámara de carbonatación fue propuesta, debido a la imposibilidad de calcularla en $k\text{-mm/años}^{0,5}$ como sucede a pie de obra, siempre y cuando exista un incremento de la X_c en función del tiempo de curado y exposición en los diferentes tipos de hormigón expuestos al ensayo acelerado como fue demostrado en este estudio.

Palabras clave: durabilidad, hormigón, carbonatación, tiempo de curado, ensayo acelerado.

ABSTRACT

measurements of the depth of carbonation (X_c). Regarding to the first, the results were confirmed with those obtained in a structure built with a reinforced concrete of a similar water/cement ratio of 0.4, exposed to the impact of the aggressive coastal environment of the atmosphere in Cuba. It continues to be demonstrated that the type of concrete elaborated with PP-35(0,4) pozzolanic cement, in addition to guaranteeing long project service life for the structures to be built, a positive economic and environmental impact ensures. A variant of the carbonation constant $k\text{-mm/days}$ determination in accelerated carbonation chamber test was proposed, due to the impossibility of calculating it in $k\text{-mm/years}^{0,5}$ as happens on site, provided that an increase in X_c exist as was demonstrated in this study, depending on the curing and exposure time in the different types of concrete exposed to the accelerated test.

Keywords: durability, concrete, carbonation, curing time, accelerated test.



INTRODUCCIÓN

La durabilidad, es la cualidad más esencial que deben presentar los materiales de construcción ya sean metálicos, inorgánicos, orgánicos y compuestos como el hormigón armado (Howland, 2013). Independientemente de su clasificación, se trata de la capacidad que tienen los mismos de resistir el entorno que los rodea en el tiempo. El efecto del entorno pudiera ser químico, físico y mecánico (Alexander, 2018). En muchas ocasiones, el material es expuesto a una combinación entre sus entornos principalmente en las construcciones metálicas y las de hormigón armado, emplazadas en zonas de elevado potencial constructivo, donde predominan las atmósferas costeras e industriales (Castañeda y col, 2012). La combinación de estos dos tipos de atmósfera en cuanto a su clasificación, es decir, costera-industrial, viceversa e industrial, constituyen las más agresivas en el deterioro anticipado de los materiales de construcción. En las dos, se origina y desarrolla de una manera muy rápida en el tiempo el fenómeno de la corrosión atmosférica en los materiales metálicos, acero al carbono y galvanizado, como los más usados en la industria de la construcción, así como en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. De acuerdo con los estudios de corrosión atmosférica realizados en Cuba en el siglo pasado y en el presente, la combinación de las atmósferas costera-industrial ha sido la más predominante en las zonas costeras de elevado potencial constructivo (Howland y Castañeda, 2017). De ahí, la importancia que revierte la ejecución de estudios por durabilidad de los materiales de construcción, en ocasiones con sus sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos. Criterios por durabilidad han sido obtenidos antes de proceder con las labores de construcción, más en zonas costeras e industriales de elevado potencial constructivo en Cuba (Marrero y col, 2020).

Con relación al hormigón armado, que es el material compuesto más usado en la industria de la construcción, su desempeño adecuado por durabilidad expuesto a una agresividad corrosiva de la atmósfera de elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX), característico en estructuras emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo, garantizará plazos elevados de vida útil de proyecto en las construcciones. De esta forma, las estructuras y las obras en general mantendrán en el tiempo su estética, funcionalidad y seguridad, sin costos inesperados en los trabajos de mantenimiento y reparación, siendo estos últimos los más costosos. Un hormigón durable es una solución ingenieril muy factible desde el punto de vista económico y social (Castañeda y col, 2020).

Para la evaluación de la durabilidad de los materiales metálicos y del hormigón simple y armado, diferentes métodos experimentales han sido usados. Disímiles experiencias han sido logradas en Cuba y en Latinoamérica durante el siglo pasado y en el presente basadas en colocar los materiales a evaluar de forma directa frente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, como medio natural de exposición, bajo la condición de exposición al exterior. La distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas ha resultado otro factor determinante en el origen y desarrollo del fenómeno de la corrosión atmosférica (Troconis, 2007; Meira y col, 2013; Castañeda y col, 2013; Guerra y col, 2019 y 2023). Sin embargo, el efecto de la carbonatación no fue tenido en cuenta en las probetas de hormigón armado colocadas en los ambientes costeros. Incluso, la condición de exposición al interior a espacio cerrado, abrigo ventilado y el efecto estufa, ha sido tenida en cuenta en Cuba en los materiales metálicos (Corvo y col, 2008; Castañeda y col, 2021). De manera general, criterios para el desempeño adecuado por durabilidad han sido obtenidos.

El efecto de la carbonatación, como uno de los fenómenos más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo y que pudiera inducir a un deterioro anticipado en el tiempo en las estructuras de hormigón armado, ha sido estudiado más bien a pie de obra. Experiencias han sido obtenidas en Cuba y mucho más recientes en el Ecuador. La determinación de las profundidades de carbonatación ($X_c\text{-mm}$) teniendo en cuenta el prolongado tiempo de construcción de las estructuras, han permitido los cálculos de la constante de carbonatación ($k\text{-mm/años}^{0.5}$) como un indicador primordial en el desempeño por durabilidad y la calidad del hormigón armado en los diferentes elementos estructurales (Carvajal, y col, 2011; Eudoro, y col, 2024; Pérez, y col, 2024; Rincón, y col, 2025; Navarino, y col, 2025). No siendo así, en cuanto a la colocación directa de probetas cilíndricas de diferentes calidades de hormigones frente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, donde solamente un reporte fue encontrado en la región de Latinoamérica a partir de un estudio realizado a finales del siglo pasado en un área de la zona costera de la península de Yucatán, México (Castro y col, 2000). Los resultados permitieron demostrar, que a mayor distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas, los valores de k resultaron mayores indicativos de un hormigón de calidad moderada. También resultó, que a valores mayores de resistencias a la compresión, menores fueron los valores de k calculados como un ejemplo en la buena calidad del hormigón en las probetas colocadas a 50 m desde la línea costera. Sin embargo, en las



probetas colocadas a mayores distancias, entre 100 y 780 m, esta tendencia no resultó clara para los hormigones con una resistencia a la compresión mayor que 22 MPa a los 28 días de curado. De esta forma, la evaluación de la durabilidad de diferentes tipos de hormigones, haciendo uso del ensayo acelerado en una cámara de carbonatación, pudiera resultar necesaria.

Los ensayos acelerados no tienden a simular los procesos transitorios de la atmósfera, como los cambios en cuanto a la velocidad del viento, del complejo humedad relativa-temperatura, la deposición de agentes agresivos y la caída de la lluvia, como factores influyentes en la corrosión atmosférica en los materiales metálicos y en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Quizás, esta pudiera ser la razón de una disminución últimamente en cuanto al uso de estos ensayos. No obstante, su ejecución no estaría restante en la evaluación de la durabilidad de materiales, específicamente en el hormigón ya sea simple o armado. Con una mayor importancia, si el hormigón ha sido elaborado haciendo uso de adiciones o materiales cementantes suplementarios, con o sin cementos puzolánicos. Los materiales puzolánicos adicionados a las mezclas de hormigón con cemento portland al reaccionar con la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) forman nuevos silicatos de calcio hidratados los cuales pueden mejorar la durabilidad de las estructuras (López y Castro, 2010). En el caso de los ensayos acelerados que inducen la carbonatación como un fenómeno que influye en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, solamente dos referencias fueron encontradas. De acuerdo con un estudio reciente ejecutado en Brasil, relacionado con la evaluación del frente de carbonatación de una estructura de hormigón sometida al hollín del fuego, la influencia del calor moderado ($< 200^\circ\text{C}$) y el hollín de los incendios en la alteración de la carbonatación, fue demostrada (Valerio y Helene, 2025). Aunque este hecho tiende a ocurrir naturalmente en todos los incendios pequeños y grandes, los autores no encontraron referencias bibliográficas sobre el tema. El ensayo acelerado no fue precisamente haciendo uso de una cámara de carbonatación. Más bien se basó en el uso de un ahumador de acero inoxidable para la realización de la quema del material combustible. En su interior, probetas de los diferentes tipos de hormigón fueron colocadas. Por otro lado, una evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado, fue ejecutada también en Brasil (Berenguer y col, 2018). Con la intención de evaluar la durabilidad de los tipos de hormigón estudiados desde el punto de vista del fenómeno de carbonatación, probetas cilíndricas fueron expuestas a la acción atmosférica del ambiente del laboratorio durante 110

días. Todo pareció indicar, que el ensayo acelerado de la cámara de carbonatación tampoco fue usado.

Con relación al uso de ensayos acelerados en estudios sobre el desempeño por durabilidad del hormigón armado, las experiencias encontradas en Cuba se basan en su ejecución bajo condiciones reales de exposición a la atmósfera, es decir, a la condición de exposición al exterior a la atmósfera (Castañeda y col, 2003, 2004, 2008 y 2010). Todos bajo la influencia de las sales de iones cloruro que como bien se conoce, es otro agente muy agresivo que origina un deterioro muy anticipado en el tiempo en las estructuras de hormigón armado producto de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. Probetas de este apreciado material de construcción en forma de paralelepípedo de dimensiones 31,5 cm de longitud y 8 cm de ancho y espesor dosificadas a diferentes relaciones agua/cemento 0,4, 0,5 y 0,6 (una probeta por cada dosificación), fueron colocadas durante un tiempo de exposición de tres años en una estación experimental de corrosión atmosférica en una zona urbana en la Habana, Cuba. El espesor de recubrimiento de hormigón fue de 2 cm y el diámetro de los aceros de refuerzo, dos por cada probeta fue de 12 mm. La agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera para el acero al carbono en la estación fue media (C3). Por tanto, resultó necesaria la aplicación de un spray salino con una disolución de NaCl al 3% simulando el aerosol marino diariamente a las tres probetas en horas de la mañana. Una deposición promedio anual de sales de iones cloruro de $850 \text{ mg/m}^2\text{d}$ fue determinada por el método de la vela húmeda. De esta forma, se logró simular, donde las probetas estuvieron expuestas, una agresividad corrosiva de la atmósfera entre muy elevada (C5) y extrema (CX) para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción (acero al carbono, cinc, cobre y aluminio), lo que resulta de una zona costera de elevado potencial constructivo a cortas distancias desde la zona de mayor rompiente de las olas, como sucede en el malecón habanero en la estación de invierno. Resultados novedosos fueron obtenidos, con la aplicación de técnicas electroquímicas en la medición mensual y anual de la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. La influencia de la relación agua/cemento, fue confirmada. Sin embargo, la influencia de la carbonatación en la durabilidad del hormigón a partir de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, no fue tenida en cuenta en estos estudios.

En Cuba, con relación a estudios basados en el desempeño por durabilidad del hormigón de manera general haciendo uso del ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, solo un reporte fue encontrado,



previo a la ejecución de este estudio (Martínez y Cruz, 2025). Probetas cilíndricas de hormigón simple, es decir, sin aceros de refuerzo elaboradas también con cemento portland ordinario y puzolánicos fueron colocadas en el interior de una cámara de carbonatación. Sin embargo, diferentes resultados como los mostrados en este estudio no fueron tenidos en cuenta. Por tanto, evaluar la durabilidad del hormigón elaborado con cemento portland ordinario y puzolánicos mediante el ensayo acelerado en cámara de carbonatación, es el objetivo general del presente estudio. Como objetivos específicos se tienen, caracterizar en función del tiempo de curado, los diferentes tipos de hormigón usados en el estudio, elaborados a diferentes relaciones agua/cemento con o sin adiciones puzolánicas, antes de ser expuestos en la cámara de carbonatación, teniendo en cuenta también

el tiempo de curado y de exposición de los hormigones, expuestos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, comparar la resistencia a la carbonatación también en los diferentes tipos de hormigón a partir de la profundidad de carbonatación (X_c -mm). Demostrar los factores influyentes en la carbonatación (X_c) en los diferentes tipos de hormigón elaborados con o sin adiciones puzolánicas. Por último, proponer una variante de determinación de la constante de carbonatación (k) como un indicador en la calidad del hormigón expuesto al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Descripción de la cámara de carbonatación

La cámara tiene dimensiones de 1 160 mm de largo, 530 mm de ancho y 530 mm de altura y forma de prisma rectangular. La armadura principal es de perfiles tipo L de acero inoxidable. En su mayor parte está cubierta de vidrio, a excepción de la tapa, la cual fue elaborada con elementos de acrílico con un espesor de tres milímetros. Estos elementos fueron fijados a la cámara mediante pegamento adhesivo de goma sintético a base de solvente, para evitar las fugas desde su interior (Figura 1 a) y b). En el interior de la cámara, donde fueron colocadas las probetas de hormigón simple en forma cilíndrica, se logró un ambiente bajo condiciones interiores a espacio cerrado con una concentración de CO_2 mayor que la condición de exposición al exterior (0,04%). La tapa consta de dos orificios de 5 mm de diámetro que sirvieron como entrada y salida de aire, así como con otro orificio de 20 mm que sirvió para insertar un medidor de humedad HR (Fig. 1 b).

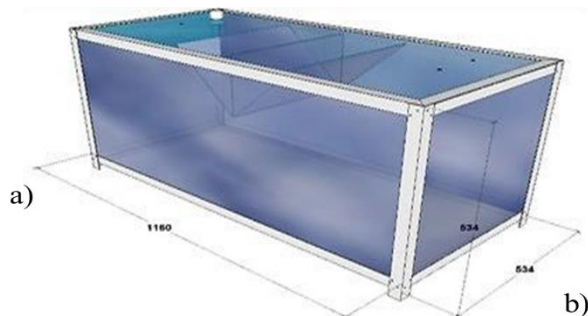


Fig. 1. Esquema de diseño de la cámara de carbonatación a) y foto con probetas cilíndricas de hormigón simple de forma cilíndrica en su interior b).

En la zona baja interior de la cámara se conectó una manguera desde el orificio de entrada de aire hasta la parte media del fondo, donde un ventilador de color negro fue colocado y justo por encima de este, en la parte media superior, se situó un deflector para lograr una mejor distribución del flujo de aire (Fig. 1 b).

Sistema de control en la condición de exposición en el interior de la cámara

Para obtener la concentración deseada de CO_2 alrededor de 4% (100 veces mayor que al exterior) y HR al $65 \pm 5\%$ en el ambiente interior de la cámara, un flujo de CO_2 fue mezclado con aire a dos niveles (seco y húmedo) provenientes de un compresor haciendo uso de un mezclador (Figura 2 a) y una estación humidificadora con sus dimensiones (Figura 2 b) respectivamente.





Fig. 2. Mezclador a) y estación humidificadora b) colocados en la parte exterior de la cámara.

Para la determinación de la concentración de CO_2 (ppm) en el interior de la cámara un equipo multifunción Testo 454, calibrado con la sonda de CO_2 tipo 0632-1240, rango de medición de 0 a 10 000 ppm y una exactitud de ± 50 ppm $\text{CO}_2 \pm 2\%$, fue usado y colocado en el interior de la cámara encima de otras probetas en forma de paralelepípedo (Fig. 1 b). La temperatura y humedad relativa se controlaron mediante un sistema de refrigeración, que constó de un compresor donde a la salida se dividió en dos flujos con un dispositivo en forma de T, uno en dirección al mezclador de gases y otro en dirección a un humidificador, el cual es un recipiente de PVC (tubo vertical) cerrado, con hielo, que contó con dos orificios con mangueras de cinco milímetros de diámetro, situados uno al lado del otro. El primero para la entrada de aire seco y el otro para la salida del aire húmedo. El flujo a la salida del humidificador se mezcló junto con el aire seco y el flujo de CO_2 en el mezclador para dirigirse hacia el interior de la cámara. De esta forma, las condiciones adoptadas para la carbonatación fueron: temperatura de 21 ± 2 °C, humedad relativa de $65 \pm 5\%$

y una concentración de CO_2 gaseoso de $4 \pm 0,1\%$. Para asegurar más la hermeticidad de la cámara, sellos de goma en la tapa y cuerpo de caja con dos seguros metálicos a presión fueron colocados. Para la prueba de hermeticidad de la cámara, posibles puntos de fugas en todas las uniones, fueron humedecidos con agua jabonosa. Burbujas no fueron detectadas; por lo que la cámara presentó la hermeticidad necesaria para el ensayo de carbonatación acelerada.

La cámara permaneció en funcionamiento continuo por un tiempo de 14 días de manera ininterrumpida, donde en el interior fueron colocadas las probetas de hormigón simple a ensayar.

Caracterización de los áridos y aglomerantes

Como parte de la metodología experimental, a continuación, se demuestran las caracterizaciones de los áridos, así como los dos tipos de aglomerantes (cementos P-35 y PP-35), usados en la elaboración de las probetas de hormigón simple en forma cilíndrica (Tablas 1, 2, 3 y 4).

Tabla 1. Ensayos físico-químicos a los áridos fino y grueso obtenidos de sus correspondientes canteras

Análisis físico-químico	UM	Árido fino Arena "Peñalver"		Árido grueso "Granito la Molina"	
		Valor	Espec.	Valor	Espec.
Peso específico corriente (PEC)	gf/cm ³	2,51	-	2,69	-
Peso específico saturado (PES)	gf/cm ³	2,57	-	2,72	-
Peso específico aparente (PEA)	gf/cm ³	2,69	>2,5	2,77	>2,5
Peso unitario suelto (PUS)	kgf/m ³	1 396	-	1 420	-
Peso unitario compactado (PUC)	kgf/m ³	1 601	-	1 642	-
Porcentaje de absorción	%	2,63	<3	1,1	<3
Porcentaje tamiz 200	%	3,92	3-5	0,98	<1
Porcentaje de huecos	%	36,16	-	38,85	-
Porcentaje de terrones de arcilla	%	0,40	<1	0,05	<=0,25
Porcentaje de azul de metileno	gf/kgf	0,0	0,3-0,6	-	-
Módulo de finura (MF)	-	2,67	2,2-3,58	-	-
Tamaño máximo del árido (TMA)	mm	-	-	9,52	-



Tabla 2. Granulometría de los áridos.

Arena Peñalver			Granito La Molina		
Tamiz	% Pasado	Espec.	Tamiz	% Pasado	Espec.
9,52	100	100	12,5	100	100
4,76	99	90-100	9,52	94	85-100
2,38	80	70-100	4,75	16	15-35
1,19	65	45-80	2,36	1	0-10
0,59	54	25-60	1,18	1	0-5
0,297	29	10-30	TMA	-	9,52
0,149	7	2-10			
Módulo de finura	2,67	2,2-3,58			

Tabla 3. Ensayos a los aglomerantes, cementos P-35 y PP-35 puzolánico elaborados en las fábricas de Artemisa y Mariel respectivamente.

Ensayos	UM	Valor	Espec.	Valor	Espec.
	Cemento portland P-35			Cemento portland PP-35	
Densidad	gf/cm ³	3,18	No se especifica	2,99	No se especifica
Consistencia normal	%	24,6	No se especifica	27,2	No se especifica
Fraguado inicial	min	92:00:0	Mín. 45	157:00:0	Mín. 45
Fraguado final	h/min	2:00:0	Máx. 10	3:25:00	Máx. 12
Peso volumétrico	kgf/m ³	1153	No se especifica	1039	No se especifica
Finura	%	2,4	No se especifica	5,6	No se especifica
Estabilidad de volumen	%	1	Máx. 10	2	Máx. 10
Resistencia a la compresión (28 días)	MPa	35	35	35	35

Los resultados de todos los ensayos realizados demostraron que los áridos usados y los aglomerantes cumplieron con las especificaciones (Espec.) exigidas en la normativa de la construcción en Cuba (Tablas 1, 2, 3 y 4).

Dosificaciones usadas en la elaboración de las probetas cilíndricas

El hormigón utilizado en la elaboración de las probetas fue dosificado teniendo en cuenta en su diseño el logro de un porcentaje mínimo de vacío entre los agregados finos y gruesos. La combinación entre los áridos, los dos tipos de cementos (P-35 y PP-35) como aglomerantes

hidráulicos, los volúmenes de agua y aditivos son mostrados (Tabla 4). Cuatro mezclas de hormigón o tipos de hormigón de relaciones agua/cemento 0,4 y 0,55 para cada cemento fueron preparadas para la elaboración de las probetas. Para asegurar 1 m³ de volumen neto de hormigón, ajustes correspondientes para cada dosis de material, fueron realizados. Cuando las mezclas de hormigón fueron diseñadas, los áridos y aglomerantes fueron pesados hasta peso constante. Por tanto, cada dosificación fue diferente cuando la relación agua/cemento cambió. El asentamiento, la densidad y temperatura de las mezclas en los cuatro tipos de hormigón son mostrados (Tabla 5).

Tabla 4. Tipos de hormigón elaborados con sus respectivas relaciones agua/cemento y aditivos.

Tipos de hormigón	Contenido de cemento (kg/m ³)	de Árido grueso (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	Contenido de agua (l)	Aditivo (l)
P-35 a/c=0,4	480	850	820	194	5,28
P-35 a/c=0,55	480	750	725	265	-
PP-35 a/c=0,4	465	855	830	185	7,81
PP-35 a/c=0,55	465	765	740	255	-



Tabla 5. Asentamiento, la densidad y temperatura de las mezclas en los cuatro tipos de hormigón

Tipos de hormigón	Asentamiento (mm)	Temperaturas (°C)				Densidad (kg/m ³)
		T ₁	T ₂	T ₃	T _{prom}	
P-35 (0,4)	70	27,3	27,8	27	27,4	2 370
P-35 (0,55)	140	28,5	28,2	28	28,2	2 228
PP-35 (0,4)	60	27,8	27,9	28,2	28	2 340
PP-35 (0,55)	110	29,2	28,9	29,1	29,1	2 225

Elaboración de las probetas cilíndricas

Para la caracterización de los cuatro tipos de hormigón antes de exponerlos en la cámara de carbonatación, cuatro probetas cilíndricas de 14 cm de altura y 7 cm de diámetro para cada tipo de hormigón simple y relación agua/cemento, fueron elaboradas. Posteriormente se

sometieron a los diferentes tiempos de curados (7 y 28 días) establecidos en la normativa cubana de la construcción, teniendo en cuenta el momento de sin curado. De esta forma 24 probetas para cada tipo de hormigón fueron obtenidas (Tabla 6).

Tabla 6. Cantidad de probetas de cada tipo de hormigón y relación agua/cemento en función de los tiempos de curado.

Tipo de hormigón	P-35		PP-35	
Relación a/c	0,4	0,55	0,4	0,55
Sin curado	4	4	4	4
7 días de curado	4	4	4	4
28 días de curado	4	4	4	4
Total por tipo de hormigón	24		24	
Total de muestras	48			

El proceso de curado fue a inmersión completa en agua a temperatura ambiente (NC ISO-1920-3:2010). El proceso de curado fue a inmersión completa en agua a temperatura ambiente (NC ISO-1920-3:2010).

Ensayos químico-físicos y mecánicos ejecutados en las probetas cilíndricas

Dos probetas cilíndricas para cada tipo de hormigón fueron usadas en las determinaciones de la resistencia a la compresión (Rc-MPa), la velocidad de pulso ultrasónico (VPU-m/s) y el porcentaje de porosidad capilar efectivo (ϵ -%), donde los dos valores determinados para cada ensayo, fueron graficados en función del tiempo de curado.

Resistencia a la compresión

De acuerdo con la normativa cubana (NC-724:2009), los 24 valores de Rc (ocho para cada tiempo de curado, dos para cada tipo de hormigón) fueron obtenidos en una máquina de ensayo CCONTROLS de fabricación italiana de fuerza máxima de compresión axial de 2 000 kN. Este ensayo al ser destructivo fue ejecutado posterior al ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

Las mismas probetas usadas en la determinación de la Rc sirvieron con anterioridad para la obtención de los 24 valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU-m/s) al ser un ensayo no destructivo. Las determinaciones de VPU (ocho para cada tiempo de curado, dos para cada tipo de hormigón) se ejecutaron a partir del método de la transmisión directa (NC-231:2002). Los transductores fueron colocados por ambas caras en cada uno de las probetas cilíndricas en posición horizontal. Un equipo de marca CCONTROLS de fabricación italiana, modelo 58 E 4800 para muestras pequeñas y medianas de hormigón fue utilizado. Antes de la ejecución de las mediciones, se realizó la calibración del equipo a partir de las barras de referencias de hormigón. En estas barras, el recorrido de la onda ultrasónica tiene un tiempo estándar al colocarle de forma directa los transductores. Rangos de clasificación exigidos en la RED DURAR de CYTED fueron usados para la clasificación de la calidad de los cuatro tipos de hormigón (Troconis y col, 1997).

Porcentaje de porosidad capilar efectivo (ϵ -%)

El ϵ se determinó de acuerdo con la metodología establecida (NC-345:2005) a partir del flujo de absorción capilar del agua en probetas de hormigones y morteros. Seis muestras de dimensiones 7 cm de

Velocidad de pulso ultrasónico



diámetro y 2 cm de espesor, fueron cortadas de las ocho probetas cilíndricas dos para cada tipo de hormigón. De esta forma 6 valores de ϵ fueron determinados, siendo graficados en función del tiempo de curado los dos valores promedios para cada tipo de hormigón para un total de ocho. Para el corte de las muestras, una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT de fabricación estadounidense fue utilizada. Al igual que la VPU, rangos de clasificación exigidos en la misma referencia fueron usados también para la clasificación de la calidad de los hormigones.

Determinación de la profundidad de carbonatación (X_c -mm)

De las 24 probetas cilíndricas restantes, es decir, las no usadas en los ensayos químico-físicos y mecánicos (Tabla 6), doce para cada tipo de hormigón, dos para cada relación agua/cemento lo mismo que ocho para cada tiempo de curado, fueron introducidas en la cámara de carbonatación por un tiempo de 14 días de manera ininterrumpida. A ese tiempo de exposición las probetas fueron extraídas y cortadas de forma transversal en la misma sierra de tungsteno. Posteriormente, a las zonas de cortadas les fue aplicada una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico

por atomización de forma uniforme a menos de 15 minutos de ejecutados los cortes (Troconis y col, 1997). De esta forma, se midió la profundidad o frente de carbonatación (X_c -mm), desde la superficie exterior hasta la zona donde se inició la coloración violeta indicativo de un pH alcalino. La X_c fue medida haciendo uso de un pie de rey digital. Los ocho valores fueron también graficados en función del tiempo de curado y sin curar al igual que la R_c , la VPU y ϵ .

Análisis estadístico comparativo

En función del tiempo de curado, para profundizar en la caracterización de los hormigones elaborados antes de exponerlos en la cámara de carbonatación, una regresión lineal (1) fue ajustada. La variable dependiente fue la R_c siendo el ϵ la variable dependiente para una data de $n=24$. Además, la influencia del ϵ la R_c y la VPU como variables independientes en la X_c como la dependiente, fue demostrada por dos métodos estadísticos ($n=24$): El primero a partir del ajuste de tres funciones exponenciales, una decreciente (2) y dos decreciente (3) y (4). El segundo, a partir de tres ajustes de la regresión lineal múltiple (5), dos para la data $n=12$ y el otro para $n=24$ (Tabla 7).

Tabla 7. Regresiones ajustadas

Regresiones	Data	No.
$R_c = a - b\epsilon$	24	1
$X_c = X_{c0} + ce^{\epsilon/t}$	24	2
$X_c = X_{c0} + de^{-R_c/t}$	24	3
$X_c = X_{c0} + ee^{-VPU/t}$	24	4
$X_c = f - gR_c - h\epsilon$	12 y 24	5

Para el ajuste de las funciones exponenciales creciente, las decrecientes, la elaboración de todos los gráficos y las regresiones lineales múltiples, software OriginPro 6.1 y Statgraphic 19-X64 fueron usados.

Determinación de la X_c -mm en función del tiempo de exposición en la cámara y de curado

Otras 80 probetas cilíndricas con las mismas dimensiones fueron elaboradas, 20 para cada tiempo de curado, donde cuatro para cada tipo de hormigón ((P-35(0,4), P-35(0,55), PP-35(0,4) y PP-35(0,55)) fueron colocadas en la cámara de carbonatación a tiempos de exposición de 0 (sin introducir en la cámara), 4, 7, 12 y 14 días a los diferentes tiempos de curado, es decir, sin curar (0), 4, 7 y 28 días. Por tanto, los dos valores medidos de la X_c obtenidos por el mismo procedimiento de la aplicación de la disolución de la fenolftaleína al 1% en alcohol etílico en las zonas de corte transversal de las probetas, fueron graficados en

función del tiempo de exposición en la cámara para cada tiempo de curado.

RESULTADOS

Caracterización de los cuatro tipos de hormigón

Influencia del tiempo de curado

Es de notar, una disminución de los dos valores del ϵ , de conjunto con un aumento de la R_c y la VPU para los cuatro tipos de hormigón en función del tiempo de curado (Figura 3 a), b) y c). La influencia del tiempo de curado en el hormigón antes de proceder con las labores de construcción, es confirmada. A tal punto, que a los 28 días de curado, los hormigones de relación agua/cemento 0,4 (P-35(0,4)) y (PP-35(0,4)) presentaron valores de ϵ menores que 10%, lo cual es indicativo de un hormigón de durabilidad adecuada (Figura 3 a) (Troconis y col, 1997). Para estos dos tipos de hormigón, la R_c estuvo por encima de 35 MPa o muy próxima en el caso del PP-35(0,4) (Figura 3 b). En ambos, la VPU fue superior a 4000 m/s representativo



de un hormigón de calidad durable (Figura 3 c) (Troconis y col, 1997). Todo parece indicar, que estos tipos de hormigón (P-35(0,4)) y (PP-35(0,4)) pudieran ser los más durables. No siendo así en los otros dos tipos de hormigón de relación agua/cemento 0,55 ((P-

35(0,55) y (PP-35(0,55))). Los valores de ε a 28 días de curado estuvieron entre 10-15% representativo de un hormigón de calidad moderada (Figura 3 a).

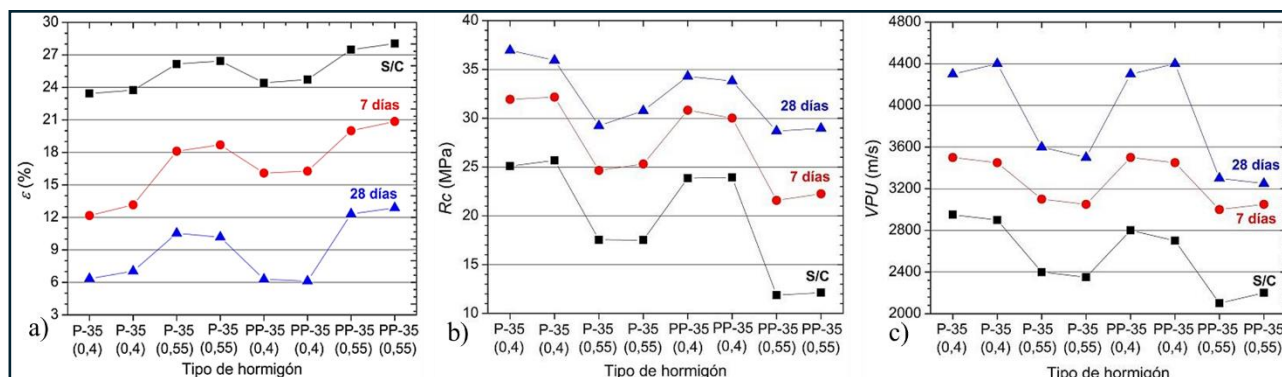


Fig. 3. Comportamiento de los valores del ε , la R_c y la VPU en función del tiempo de curado para los cuatro tipos de hormigón.

Los valores de R_c resultaron menores que 30 MPa (Figura 3 b), a pesar de que la VPU sus valores hayan estado entre 3001-4000 m/s (Figura 3 c) representativo

de un hormigón de calidad elevada (Troconis y col, 1997). La influencia del incremento de la relación agua/cemento es confirmada.

Comportamiento de la X_c

Todo lo explicado anteriormente se relaciona con el comportamiento de los dos valores de la X_c en las otras probetas cilíndricas para los cuatro tipos de hormigón expuestas en la cámara de carbonatación por un tiempo de 14 días de exposición. Se observa también, una disminución considerable en función del tiempo de

curado. Los hormigones de relación agua/cemento 0,4 (P-35(0,4)) y (PP-35(0,4)), sus valores de X_c resultaron menores que 5 mm (Figura 4). Se confirma, que estos dos hormigones son los más resistentes, es decir, los más durables, expuestos al ensayo acelerado de la cámara de carbonatación.

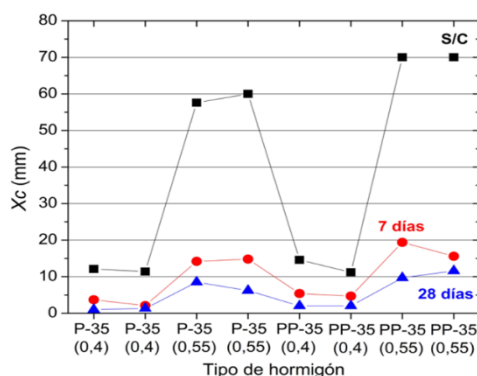


Fig. 4. Comportamiento de los valores de la X_c en función del tiempo de curado para los cuatro tipos de hormigón.

El resultado pudiera ser representativo para las estructuras que se pretenden construir en zonas de elevado potencial constructivo donde predominen las atmósferas costera-industrial, viceversa y la industrial solamente, así como en los revestimientos de hormigón armado usado en las construcciones expuestas a la

condición subterránea de exposición en Cuba. Una concentración elevada de CO_2 es característica en esta condición de exposición (Martínez y Castañeda, 2026). Las estructuras han estado muy afectadas por el fenómeno de la corrosión en los aceros de refuerzo debido a la carbonatación en el hormigón.



Factores influyentes en la carbonatación en los diferentes tipos de hormigón

De forma independiente, el buen ajuste de las funciones exponenciales según los valores del coeficiente de determinación (R^2), la creciente (2) y las dos decrecientes (3) y (4) (Tabla 7), demostraron la

influencia de la disminución del ε , así como los incrementos de la R_c y la VPU en el aumento de la X_c (Figura 5 a), b) y c).

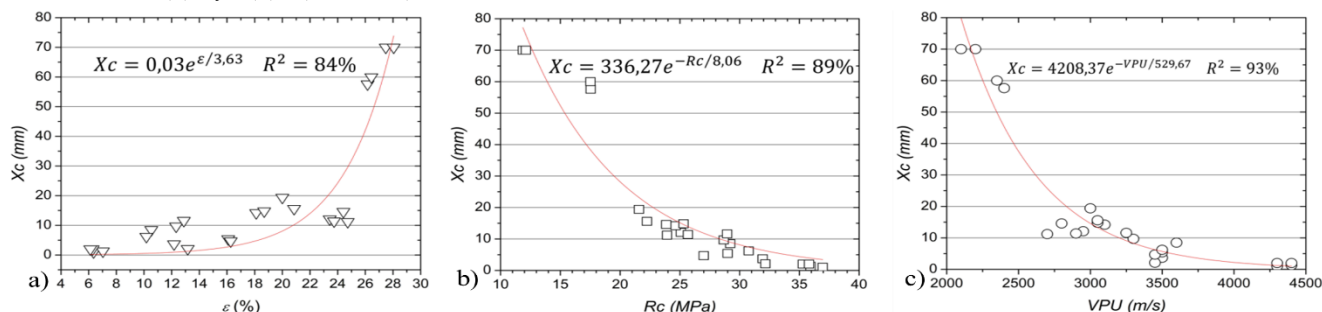


Fig. 5. Ajuste de las funciones exponenciales creciente a), y las decrecientes b) y c) donde se demuestra los factores influyentes en la X_c .

El hecho de que los valores de X_{c0} no aparezcan en los ajustes (Tabla 7) confirma los comportamientos de la X_c en función del ε , la R_c y la VPU . En caso de haber obtenido los valores de X_{c0} , una asíntota horizontal al eje de las x hubiera aparecido en cada función ajustada demostrando que hasta un cierto valor para el ε y a partir de ciertos valores de la R_c y la VPU la X_c es independiente de dichos factores influyentes.

Por otra parte, es de notar en cada uno de los comportamientos y ajustes, como de una forma más clara, los cuatro valores menores de la X_c propio de los dos tipos de hormigón P-35(0,4) y PP-35(0,4) se corresponden con los valores menores del ε (entre 4 y 6%) y mayores de la R_c (entre 35 y 38 MPa) y la VPU (entre 4250 y 4500) (Figura 5 a), b) y c). Otra forma de confirmar que estos hormigones, pudieran resultar los más durables y no solo frente al ensayo acelerado de la cámara de carbonatación.

El comportamiento que presentó la X_c de conjunto con el ε , la R_c y la VPU en función del tiempo de curado, posibilitó entonces los tres ajustes de la regresión lineal

múltiple (5). De esta forma, se pudo demostrar cuál de los factores o variables independientes resultó más influyente en la X_c teniendo en cuenta el tiempo de curado a los 14 días de expuestas las probetas en la cámara de carbonatación.

El buen ajuste de las tres regresiones lineales múltiples a partir de los valores del coeficiente de determinación (R^2), indicador de la calidad del ajuste, y del nivel de significación (p). Las dos primeras tomando un valor de cada variable ($n=12$), y la tercera haciendo uso de la data total ($n=24$), es decir, los dos valores para cada tipo de hormigón, permitió demostrar como la disminución tanto de la R_c y el incremento del ε resultaron influyentes en el aumento de la X_c (Tabla 8). Se reitera que, teniendo en cuenta el tiempo de curado y de exposición de los hormigones expuestos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación por un tiempo de 14 días de manera ininterrumpida donde posteriormente los valores de la X_c fueron medidos en cada una de las probetas cilíndricas en la zona de corte transversal.

Tabla 8. Regresiones lineales múltiples ajustadas

Series	Regresiones	R ² (%)	p
1 n = 12	$X_c = 149,06 - 4,09R_c + 1,36\varepsilon$	80	0,0003
2 n = 12	$X_c = 178,16 - 4,79R_c + 1,94\varepsilon$	80	0,0003
Total n = 24	$X_c = 162,05 - 4,40R_c + 1,62\varepsilon$	82	0,0000

Se demostró, además, que, de los dos factores, el incremento de la R_c resultó el más influyente en la X_c o lo que es lo mismo en la durabilidad de estos tipos de hormigón expuestos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación. Valores mayores de las pendientes o coeficientes fueron obtenidos (Tabla 8). Se continúa demostrando la importancia de este requerimiento por durabilidad (R_c) para garantizar plazos elevados de vida útil de proyecto en las estructuras que se pretenden construir. A pesar de que la VPU no haya aparecido en los modelos ajustados, no deja de ser un requerimiento muy importante en la durabilidad del hormigón y en la vida útil de las estructuras.

Comportamiento de la X_c en función del tiempo de exposición en la cámara de carbonatación

Un incremento notable de la X_c en función del tiempo de exposición y curado de las probetas cilíndricas expuestas al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación es observado (Figura 6 a-f). Más en los dos tipos de hormigón P-35(0,55) y PP-35(0,55). Por tanto, de acuerdo con este comportamiento, se continúa demostrando que los hormigones P-35(0,4) y PP-35(0,4) son los más durables en el ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, siendo representativo para las estructuras que pretenden ser construidas en Cuba.

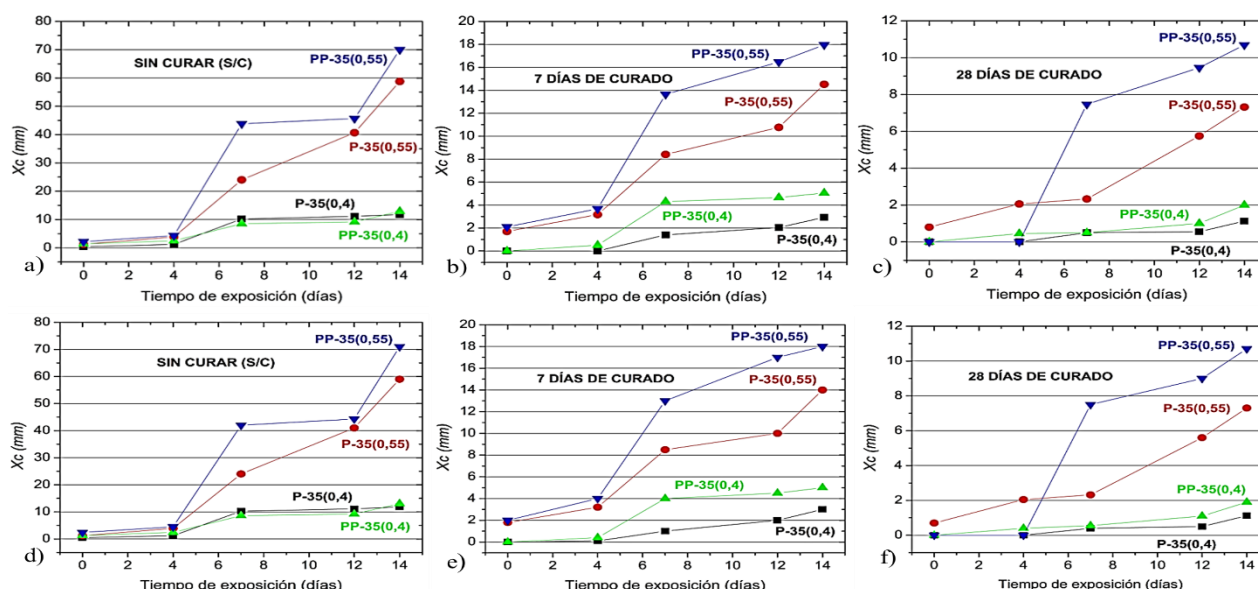


Fig. 6. Comportamiento de la X_c en función del tiempo de exposición y curado de las probetas cilíndricas de los cuatro tipos de hormigón.



Por otra parte, este comportamiento permitió entonces el cálculo de la pendiente (k) a partir del buen ajuste del modelo de regresión lineal (Tabla 9) para cada comportamiento según los valores de los coeficientes de regresión (r) y nivel de significación (p). Se trata de una forma de evaluar la velocidad de penetración del frente de carbonatación en las probetas o la constante de carbonatación indicador de la durabilidad y calidad del hormigón expuesto al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, pero en este caso k -mm/días. Una disminución de los dos valores de k calculados para cada comportamiento en función del tiempo de curado es notada (Tabla 9). La influencia del tiempo de curado en el hormigón continúa siendo confirmada.

Por otra parte, se observa como a los 28 días de curado, es evidente que los valores menores de k fueron determinados en los dos tipos de hormigón P-35(0,4) y PP-35(0,4), lo cual demuestra un avance muy lento del frente de carbonatación (Tabla 9). Se continúa confirmado, que estos hormigones vienen siendo los más durables. No siendo así en los otros dos P-35(0,55) PP-35(0,55), donde los valores de k resultaron mucho más elevados a los 28 días de curado. Incluso, para este último los dos valores de k están más próximos a 1 (Tabla 9). La influencia de la relación agua/cemento continúa siendo confirmada también, independientemente del cemento usado en la elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón.

Tabla 9. Valores de k determinados para cada comportamiento a partir del ajuste de la regresión lineal.

$X_c = kt$										
SIN CURAR (S/C)				7 DÍAS DE CURADO			28 DÍAS DE CURADO			
Tipo de hormigón	k (mm/días)	r	p (<0,05)	k (mm/días)	r	p (<0,05)	k (mm/días)	r	p (<0,05)	
P35(0,4)	0,89	0,91	0,03	0,21	0,95	0,01	0,07	0,91	0,03	
	0,89	0,90	0,03	0,21	0,96	0,008	0,07	0,90	0,03	
P35(0,55)	4,13	0,96	0,006	0,90	0,97	0,04	0,46	0,96	0,007	
	4,16	0,96	0,006	0,84	0,96	0,007	0,46	0,96	0,006	
PP35(0,4)	0,80	0,94	0,01	0,39	0,91	0,02	0,12	0,91	0,02	
	0,81	0,94	0,01	0,38	0,92	0,02	0,12	0,95	0,01	
PP35(0,55)	4,75	0,93	0,02	1,22	0,95	0,01	0,84	0,93	0,01	
	4,74	0,93	0,02	1,24	0,96	0,008	0,83	0,93	0,01	

Observación visual de las probetas a los 14 días de exposición en la cámara de carbonatación

La observación visual de las zonas de corte en las probetas a los 14 días de exposición en la cámara de carbonatación permite confirmar el avance del frente de carbonatación determinado a partir de las mediciones de X_c en las zonas de corte de las probetas cilíndricas sin curado (S/C), así como a 7 y 28 días de curado (Fig. 7). Se confirma desde un primer momento, es decir, sin curar el hormigón, una mayor resistencia a la carbonatación en los dos tipos de hormigón P-35(0,4) PP-35(0,4). La coloración blanca es indicadora hasta donde el frente de carbonatación avanzó (X_c pH<9) y la violeta donde no ocurrió el fenómeno de la carbonatación indicadora del pH alcalino (entre 9-13)

en la solución presente en los poros del hormigón (Fig. 7). En otras palabras, donde la reserva alcalina es mantenida en la dicha solución, siendo un factor influyente en la pasivación del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Es de notar, como para los dos tipos de hormigón P-35(0,55) PP-35(0,55) sin curar (S/C) el frente de carbonatación casi que abarcó toda la superficie en contacto con la solución indicadora (fenolftaleína al 1%). Más para el segundo (Fig. 7). De ahí la importancia del curado desde un primer momento, es decir, al colocarlo en las estructuras en fase constructiva, para los hormigones elaborados con cementos puzolánicos de elevadas relaciones agua/cemento. En función del tiempo de curado, se observa una disminución de la X_c (zona de coloración



blanca) siendo más evidente en los dos tipos de hormigón de relación agua/cemento 0,4 confirmando la influencia de este importante requerimiento como un

indicador de la durabilidad y la calidad del hormigón (Fig. 7).



Fig. 7. Observación visual de las zonas de corte en las probetas a los 14 días de exposición en la cámara de carbonatación.

La influencia de la relación agua/cemento se evidencia mucho más a los 28 días de curado, donde para los dos tipos de hormigón P-35(0,4) PP-35(0,4) la coloración violeta abarcó casi toda la superficie de las dos zonas de corte. Los valores aproximados de X_c fueron 1 y 2 mm respectivamente (Fig. 6 c). No siendo así para los otros dos tipos de hormigón P-35(0,55), PP-35(0,55); por lo que se confirma a partir de la observación visual, que los dos tipos de hormigón P-35(0,4) PP-35(0,4) son los que presentan una mayor durabilidad expuestos al ensayo acelerado de la cámara de carbonatación por un tiempo de 14 días de manera ininterrumpida.

DISCUSIÓN

Para nada es un secreto el déficit de curado en la tecnología del hormigón en Cuba y más a los 28 días como un requerimiento por durabilidad, independientemente del método que se utilice ya sea a pie de obra o en los elementos estructurales antes de proceder con las labores de construcción (Howland, 2013). En caso de tener un hormigón elaborado con una relación agua/cemento 0,4 elaborado con o sin cemento puzolánicos (P-35(0,4) PP-35(0,4)), donde se piensa que garantizará plazos elevados de vida útil de proyecto en

las estructuras que pretenden ser construidas, la ausencia del curado, en este caso en inmersión total en agua, provocaría valores muy elevados de ϵ con una durabilidad inadecuada ($\epsilon > 15\%$), siendo un hormigón normal según los valores de VPU a pesar de poseer valores de $R_c \sim 25 MPa$ (Figura 3 a), b) y c).

Castañeda y col demostraron, que hormigones con valores promedios de R_c entre 28-30 MPa y 24-26 MPa de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 respectivamente, elaborados con el mismo método de dosificación usado en este estudio y con 28 días de curado a inmersión total en agua, no resultaron durables frente al impacto del ambiente agresivo costero a espesores de recubrimiento de hormigón de 20-40 mm. La vida útil de proyecto para las estructuras no resultó superior a los cinco años. La corrosividad de la atmósfera fue clasificada como extrema (CX) para el acero al carbono (Castañeda, y col, 2023 y 2024). Por tanto, es casi seguro, que tampoco sean resistente al fenómeno de la carbonatación como fue demostrado para los tipos de hormigón de relaciones agua/cemento 0,55 evaluados en este estudio (P-35(0,55) y PP-35(0,55)) expuestos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación. No siendo así en los hormigones elaborados con una relación

agua/cemento 0,4 (P-35(0,4), PP-35(0,4)), donde para la condición de exposición al exterior a la atmósfera citada anteriormente, un hormigón muy similar al P-35(0,4) con un espesor de recubrimiento de 40 mm, garantizó plazos elevados de vida útil de proyecto superior a los 50 años, siendo también resistente a la carbonatación. La R_c osciló entre 35-37 MPa.

Carvajal y col demostraron, que para una estructura construida con un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 similar, independientemente del diseño de mezcla usado en la elaboración del hormigón, expuesta al impacto del ambiente agresivo costero

emplazada por un tiempo de exposición de 30 años en una zona donde la corrosividad de la atmósfera también fue extrema para el acero al carbono (CX), los valores de X_c medidos fueron menores que 7 mm en las columnas de la estructura (Figura 8). De esta forma, los valores de la constante de carbonatación $k\text{-mm/año}^{0.5}$ resultaron inferiores a 6 (valor promedio de 1,29 $\text{mm/año}^{0.5}$), siendo un hormigón de durable, o lo que es lo mismo de buena calidad. El acero de refuerzo mantuvo su condición de pasivación (Carvajal, y col, 2011).



Fig. 8. Ensayo de carbonatación en una de las columnas de la estructura. Se observa la coloración violeta en toda la zona del hormigón y el estado de pasivación en el acero de refuerzo.

Por tanto, los dos tipos de hormigón P-35(0,4) y PP-35(0,4), no cabe dudas que pueden ser evaluados como muy durables, resistentes a la carbonatación, garantizando plazos elevados de vida útil de proyecto a las estructuras que se pretenden construir en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Cuba. Resultado este muy fundamental también para la construcción de los revestimientos de hormigón armado usado en las construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición en Cuba.

Con relación a la influencia del tiempo de curado, Guerra y col demostraron que, partir de 17 días de curado también en inmersión total en agua a temperatura ambiente, hubo un incremento considerable en la R_c para hormigones de relación La R_c continúa demostrándose como un factor muy influyente en la durabilidad del hormigón. Para que un hormigón sea durable en Cuba y garantice plazos elevados de vida útil de proyecto en las estructuras expuestas al medio natural de exposición a la atmósfera, principalmente para la condición de exposición al exterior y bajo condiciones soterradas, así como al agua de mar como otro medio natural de exposición para las

agua/cemento 0,4, similar al evaluado en este estudio. Se trató entonces de un tiempo de curado crítico establecido (Guerra, Howland y Castañeda 2017). Por tanto, un tiempo de curado de siete días a inmersión completa en agua no resultó suficiente para que el hormigón sea evaluado de durable con una buena calidad como sucedió en este estudio. Valores de ε entre 10-15% indicativo de un hormigón de calidad moderada fueron obtenidos para los tipos de hormigón P35(0,4) y PP35(0,4). Además, los valores de R_c no resultaron mayores que 35 MPa a pesar de que la VPU , sus valores hayan estado entre 3001-4000 m/s, representativo de un hormigón de calidad elevada (Figura 3 a), b) y c).

condiciones de exposición de marea y salpicadura. La R_c tiene que ser mayor que 35 MPa. De esta forma, se garantiza un hormigón con valores de $\varepsilon < 10$ típicos de durabilidad adecuada, lo cual es demostrado en el ajuste de la regresión lineal (1) usando los valores obtenidos en este estudio (Figura. 9).

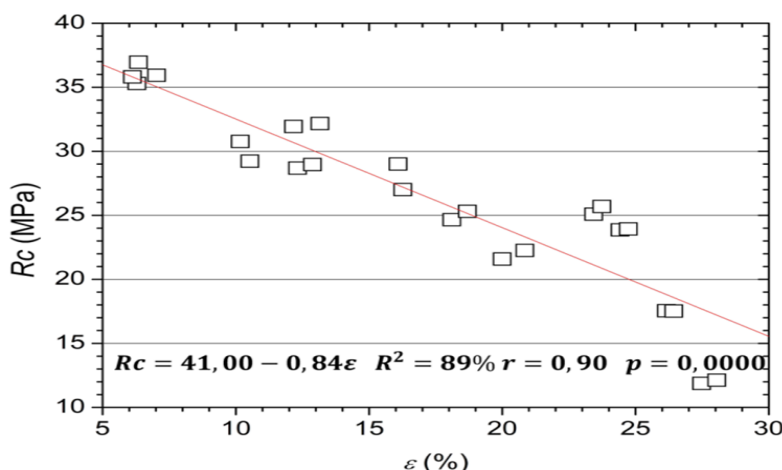


Fig. 9. Relación entre la R_c y el ε según el modelo de regresión lineal ajustado.

Esta condición fue demostrada por Castañeda y col, en un estudio sobre la evaluación de la calidad del hormigón antes de construir estructuras sometidas a condiciones medioambientales de exposición (Castañeda y col, 2017).

La razón fundamental en cuanto al cálculo de los valores de $k\text{-mm/días}$ pudiera interpretarse como una variante en la determinación de los valores de la constante de carbonatación ($k\text{-mm/años}$) en ensayos acelerados como el de la cámara de carbonatación. Esta constante o velocidad del frente de carbonatación es muy determinada a pie de obra para evaluar la durabilidad y calidad del hormigón. Experiencias recientes como un factor influyente en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, fueron mostradas en los estudios de diagnóstico y patología en ejecutados en las estructuras emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Ecuador. Lo que sucede realmente es que, para el cálculo de la $k\text{-mm/años}$ deben garantizarse tiempos de exposición prolongados (>10 años) en las estructuras. Requisito que no se logra en el hormigón expuesto al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación.

Por último, el hecho de usar cementos con adiciones puzolánicas en la elaboración del hormigón incide, además de su durabilidad (PP-35(0,4) muy similar al P-35(0,4) a un tiempo de curado a 28 días, en un impacto ambiental y económico. Rodríguez y col, demostraron en un estudio realizado en Cuba, que, como una variante de mejora ambiental, se propuso la implementación de un cemento alternativo al P-350 denominado PP-350, portland puzolánico; y la producción de otro cemento muy similar al PP-250 denominado Pz-250, con una variación en su composición química. De esta forma, se reduciría en alrededor de un 28% el consumo actual de clínker para

hacer cementos, dejándose de emitir a la atmósfera alrededor de 31,962 t de CO_2 y 646,23 t de SO_2 al año; favoreciendo a la empresa con un beneficio anual de USD \$ 1 679 607 a partir del ahorro, demostrándose la factibilidad técnica, económica y ambiental de esta propuesta (Rodríguez y col, 2012).

CONCLUSIONES

Un estudio basado en la durabilidad de cuatro tipos de hormigón P35(0,4), PP35(0,4), PP35(0,4) y PP35(0,55) elaborados con cemento portland ordinario P35 y puzolánicos PP35 en probetas cilíndricas de relaciones agua/cemento 0,4 y 0,55; expuestas al ensayo acelerado en cámara de carbonatación, fue ejecutado en Cuba llegando a las siguientes conclusiones: Los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de los cuatro tipos de hormigón antes de exponerlos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, permitieron confirmar la importancia en cuanto a someter siempre que sea posible el hormigón a tiempos de curados de 28 días, a inmersión completa en agua a temperatura ambiente, principalmente para los hormigones elaborados con una relación agua/cemento 0,4 (P35(0,4), PP35(0,4)). Un tiempo de curado a los siete días, no resultó suficiente para la obtención de un hormigón durable. Los requerimientos por durabilidad, principalmente la resistencia a la compresión como el factor más influyente en la durabilidad del hormigón, teniendo en cuenta además el porcentaje de porosidad capilar efectivo, fueron confirmados, para garantizar plazos elevados de vida útil de proyecto en las estructuras que se pretenden construir en zonas costeras de elevado potencial constructivo y en los revestimientos de hormigón armado en las construcciones expuestas a la condición soterrada de exposición. Los dos tipos de hormigón P35(0,4) y PP35(0,4) se comportaron como los más durables

expuestos al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación a partir de las mediciones de la profundidad de carbonatación (X_c). El resultado fue confirmado con la observación visual de las probetas. Con relación al primero (P35(0,4)), los resultados fueron confirmados con los obtenidos en una estructura construida con un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 similar, expuesta al impacto del ambiente agresivo costero emplazada por un tiempo de exposición de 30 años en una zona donde la corrosividad de la atmósfera fue extrema (CX). Se continúa demostrando, que el tipo de hormigón elaborado con el cemento puzolánico PP-35(0,4) garantiza también plazos elevados de vida útil de proyecto a las estructuras que se pretenden construir, pero dosificado con una relación agua/cemento también de 0,4; lo cual garantiza un impacto positivo económico y ambiental. Una variante de determinación de la constante de carbonatación $k\text{-mm/días}$ fue propuesta, ante la imposibilidad de calcularla en $k\text{-mm/años}^{0.5}$ como sucede a pie de obra, para evaluar la durabilidad del hormigón expuesto al ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, siempre y cuando exista un incremento de la X_c en función del tiempo de curado en los diferentes tipos de hormigón a ensayar como fue demostrado en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Howland, J. J., Tecnología del hormigón para ingenieros y arquitectos. Editorial Félix Varela, La Habana, 2013.
- M. G. Alexander (2018) "Diseño y modelado de vida útil de estructuras de hormigón: antecedentes, desarrollos e implementación", Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 224-245.
- Castañeda, A.; Rivero, C.; Corvo, F.; Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba. REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CHILE. Volumen 11. No 3, pp 49-61. 2012.
- Howland, J. J.; Castañeda, Abel.; El ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado. Editorial Nuevo Milenium. Sello Científico Técnico. ISBN: 978-959-05-1026-7. La Habana, Cuba, Año 2017.
- Marrero, Águila, Rigoberto; Castañeda, Valdés; Abel, Howland, Albear, Juan José; Valdés, Clemente, Cecilia; Corvo, Pérez, Francisco; González, Ortega, Lilia; McNeil, Montañés, Brenda, Juan Carlos Guerra Mera.; Estudio sobre protección de materiales de construcción expuestos al clima tropical costero de Cuba. Revista ANALES DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA. Vol. 10, pp.183-186. Año 2020.
- Castañeda, Valdés. Abel., Marrero, Águila. Rigoberto., Valdés, Clemente. Cecilia., Howland Albear Juan. José. Economic contribution in studies of atmospheric corrosion and deterioration of materials in strategic zones of the tropical coastal climate of Cuba. Chemical Technology Journal, Vol. 40, N° 1. ISSN 2224 6185. Year 2020.
- Trocónis, O., Duracon Collaboration. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. Corrosion Science. 49, (2007), pp. 2832–2843.
- Meira, G. R., y col., Durability of concrete structure in marine atmosphere zone. The use of chloride deposition rate on wet candle as an environment indicator. Cement and Concrete Composites, 32, (2010), pp. 427–435.
- Castañeda, A.; Corvo, F., Howland, J. J., Pérez, T. Atmospheric corrosion of reinforced concrete steel in tropical coastal regions.. ENGINEERING JOURNALS. TAILANDIA. Vol. 17, No.2, 2013.
- Guerra, J. C; Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J. J; Rodríguez J.; Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea. Materials and Corrosion; 70: 444–460; 2019.
- Guerra, Juan Carlos, Sabando García, Angel Ramón; Goretty Pin-Mera, Miriam; Rodríguez Díaz, Joan Manuel; Castañeda Valdés, Abel. Assement of atmospheric corrosivity in coastal areas: Case study in port Lopez, Manabí. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9 (2024) 100703.
- Corvo, F., Pérez, T., Dzib, L. R., Martín, Y., Castañeda, A., González, E., Pérez, J., Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. Revista Corrosion Science. 50, (2008), pp. 220 – 230.
- Castañeda, Abel., Corvo, Francisco.; Pech, Ildefonso., Valdés, Cecilia., Marrero, Rigoberto., Del Angel-Meraz, Ebelia. Atmospheric Corrosion in an Oil Refinery Located on a Tropical Island under New Pollutant Situation. Revista Journal Material Engineering and Perfomance. Vol. 30, pages 4529–4542 (2021).



- Carvajal, A, M; Vera, R; Corvo, F; Castañeda, A.; Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. REVISTA CORROSION ENGINEERING, SCIENCE AND TECHNOLOGY. UK. Vol. 47. No.1. 2011.
- Eudoro, Moreira, F; Guerra, Mera, J, C.; Análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en una zona costera de Manta, Manabí Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (publicación continua): 078-086. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.
- Pérez, Véliz, J, A; Guerra, Mera, J, Carlos.; Evaluación de la durabilidad en elementos estructurales de hormigón armado en estructuras emplazadas en Manta Manabí, Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (Publicación continua): 179-195. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.
- Rincón Zambrano, D, A., Guerra, Juan Carlos., Análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en crucita, Portoviejo, Manabí Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 56. (publicación continua): 001-023. Año. 2025. e-ISSN: 2221-2442.
- Navarino Guerrero Zambrano, J, y col.; Evaluación del deterioro por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en una zona costera de Pedernales, Manabí Ecuador. Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA. Pruebas de Galera, 2025.
- Castro, P., Sanjuán, M, A., Genesca, J., Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Revista Building and Environment**. 35, (2000), pp. 145-149.
- López, Mauricio., Castro, José Tomás. Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. Rev. ing. constr. v.25 n.3 Santiago 2010
- Valerio, A., Helene, P. (2025), "Evaluación del frente de carbonatación de una estructura de hormigón sometida a hollín de fuego", Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 19 - 34,
- Berenguer, R. A., Mariz, J. C. Just, Â., Monteiro, E. C. B. Helene, P. Oliveira, R. A. Carneiro, A. M. P. (2018), "Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 178 – 193.
- Castañeda, A., Corvo, F., O' Reilly, V., Comparación entre el pronóstico de corrosión basado en la medición de potenciales y la determinación de la velocidad de corrosión de **la barra de refuerzo** mediante técnicas electroquímicas. Revista Materiales de Construcción. 53 (2003), pp. 155 – 164.
- Castañeda, A., Corvo, F., Meitín, J., Determinación de la Velocidad de Corrosión de la Barra de Refuerzo del Hormigón Armado mediante Técnicas Electroquímicas de Corriente Directa. Revista CENIC, EBSCO. CIENCIAS QUÍMICAS. 35 (2004), pp. 147 – 151.
- Castañeda, A., Caracterización de la corrosión en el acero de refuerzo del hormigón armado en presencia de iones cloruro. Reseña de la Tesis de Maestría. Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICAS. 39, (2008), pp. 56 y 57.
- Castañeda, A., Corvo, F., González, J., Estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado a partir de técnicas electroquímicas y convencionales. Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA. 41. (2010).
- Martínez, Domínguez, R., Cruz, Delgado, I. Cámara de carbonatación acelerada para estudios de durabilidad del hormigón en Cuba. Revista Científica y Tecnológica UPSE, e-ISSN: 1390-7697, ISSN: 1390-7638, Vol.12 N°2. Edición Diciembre 2025, pp. 136-147.
- Norma Cubana NC ISO-1920-3 2010. Ensayos de hormigón. Parte 3: Elaboración y curado de probetas para ensayos.
- Norma Cubana NC-724:2009. Ensayos al hormigón. Resistencia del hormigón endurecido.
- Norma Cubana NC 231:2002. Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad de pulso ultrasónico en el hormigón.
- Norma Cubana NC 345:2005. Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- Trocónis, O.; Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil, 1997.
- Martínez, Domínguez. Reneilder., Castañeda, Valdés. Abel. Desempeño por durabilidad de revestimientos de hormigón armado en construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición en Cuba. **Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICAS. Pruebas de galera (2026).**
- Castañeda, Valdés, A.; Corvo, F; Marrero-Águila, R; Fernández-Domínguez, A; Del Angel-Meraz,



- Eb.; The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. *Materials and Structures* 56:12. 2023.
- Castañeda, Valdés, A; Corvo, Pérez, F; Pech, Pech, I.; Marrero Águila, R.; Bastidas-Arteaga, E. Durability Requirements for Reinforced Concrete Structures Placed in a Hostile Tropical Coastal Environment. *Buildings* 2024, 14, 2494.
- Guerra, Mera, Juan Carlos., Howland, Albear, Juan José, Castañeda, Valdés Abel. Primeras experiencias en el desempeño por durabilidad de un hormigón antes de usarlo en el perfil costero de Manabí, Ecuador. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, Vol. 48, No. 1, pp. 027-040, 2017.
- Castañeda, A; Howland, J, J; Corvo, F; Marrero. R.; Concrete quality assessment before building structures submitting to environmental exposure conditions. *REVISTA DE LA*

- CONSTRUCCIÓN DE CHILE. Volumen 16. No.3, pp. 374-387. Año. 2017.
- Rodríguez, B., León, R. M., Romero, J. L. Comparación técnica, económica y ambiental de los cementos cubanos portland P-350 y PP-250 con sus equivalentes puzolánicos PP-350 y PZ-250. *Revista INGE CUC*, Volumen 8, Número 1, Octubre de 2012, pp. 281-292

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Abel Castañeda Valdés. Autor principal. Responsable de la elaboración de los gráficos y los análisis estadísticos comparativos. Interpretación de los resultados Redacción del artículo.

Reneilder Martínez Domínguez. Autor principal. Responsable de la ejecución de todos los ensayos tanto en los áridos, los aglomerantes y en las probetas cilíndricas, así como responsable además de la ejecución de las mismas. Interpretación de los resultados. Redacción del artículo.

En este artículo no existen conflictos de interés entre los autores.

Los autores no declaran conflictos de intereses.

