



Revista CENIC. Ciencias Químicas

ISSN: 1015-8553

editorial.cenic@cnic.edu.cu

Centro Nacional de Investigaciones
Científicas
Cuba

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, núm. 1, 2017, pp. 27-40

Centro Nacional de Investigaciones Científicas
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181654080001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Primeras experiencias en el desempeño por durabilidad de un hormigón antes de usarlo en el perfil costero de Manabí, Ecuador.

Juan Carlos Guerra Mera, Juan José Howland Albear, * Abel Castañeda Valdés.**

Universidad Técnica de Manabí, Ave Urbina y Che Guevara, Portoviejo, Manabí, Ecuador. Correo electrónico: jguerra@utm.edu.ec. *Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba. **Grupo de Protección de Materiales. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, La Habana, Cuba.

Recibido: 05 de abril de 2017.

Aceptado: 20 de junio de 2017

Palabras clave: resistencia a compresión, porosidad, durabilidad, hormigón, corrosividad.

Key words: compressive strength, porosity, durability, concrete, corrosivity.

RESUMEN. En muchos lugares, incluido el Ecuador y varios países de Iberoamérica, la evaluación del desempeño por durabilidad de los hormigones se realiza a partir de la determinación de su resistencia a compresión y en ocasiones también, de la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico en probetas o estructuras ya construidas. Esos casos sin embargo, no consideran los resultados de otros ensayos que sí directamente definen criterios por durabilidad empleados en países europeos, Norteamérica y Cuba, como es por ejemplo la determinación de la porosidad efectiva a través del ensayo de porcentaje de porosidad capilar a través del cual puedan penetrar agentes agresivos al acero de refuerzo o al propio hormigón; y el índice de saturación de Langelier, dirigido a definir el nivel de corrosividad de las aguas en contacto con el hormigón. Teniendo ello en cuenta, este artículo recoge las primeras experiencias en Ecuador en la determinación de estos dos parámetros de durabilidad en las estructuras de hormigón tomando a modo de caso de estudio el perfil costero de Manabí. Por otra parte, el artículo se basó también en los resultados de la determinación de la porosidad capilar tanto para agua potable como de mar, con una valoración estadística y analítica completa, algo similar a lo mostrado en relación con el índice de saturación de Langelier.

ABSTRACT. Performance evaluation for concrete durability from compressive strength and sometimes from ultrasonic pulse velocity determination has been carried out in probes and structures already built. However, results of other tests that directly defines durability criteria used in European countries, North America and Cuba as effective porosity determination from percentage of capillary porosity test through which aggressive agents can penetrate to reinforced steel or the concrete itself, as well as, Langelier saturation index directed to define the corrosivity level of waters in contact with the concrete, have not been considered. Taking this into account, the paper presents the first experiences in Ecuador in the determination of these two durability parameters in the concrete structures taking as a study case the coastal profile of Manabí. On the other hands, the article on determination of capillary porosity results was also based for drinking water and sea water; with a statistical and analytical evaluation complete, somewhat similar in relation to Langelier saturation index was shown.

INTRODUCCIÓN

Junto al desempeño por resistencia, el desempeño por durabilidad del hormigón constituye una herramienta necesaria para la evaluación de los plazos de vida útil de las estructuras, fundamentalmente las expuestas a categorías de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera entre elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX).¹ La atmósfera, por su gran difusión y extensión, es el medio de exposición a que están sometidas no solo las estructuras de hormigón armado, sino también las construidas con los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, como son aceros al carbono, aceros galvanizados y aleaciones de cobre, cinc y aluminio.²⁻⁶

Estas categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera son muy comunes en zonas de climas tropicales costeros, en ocasiones clasificadas como costera industrial. Tal es el caso de algunas zonas costeras de Cuba producto de una deposición promedio anual de compuestos de azufre en la atmósfera superior a los 24 mg/m²d.⁷⁻⁹ Ello se debe a la

presencia de industrias y al tráfico intenso de autos en el entorno donde se encuentran o se pretenda emplazar las estructuras.

La evaluación del desempeño por durabilidad de los hormigones en el Ecuador se realiza teniendo en cuenta la obtención de uno o quizás dos parámetros antes de emplearlo en el proceso de construcción de las estructuras. En particular se emplea la resistencia a compresión y en ocasiones, la velocidad del pulso ultrasónico.¹⁰ Esta tendencia, aunque se emplea también en otros países de Iberoamérica, sin dudas no es suficiente ya que no considera parámetros que sí definen durabilidad, como lo es la porosidad capilar y el índice de Langelier.¹¹

La porosidad efectiva juega un papel fundamental en el desempeño por durabilidad del hormigón, ya que es un parámetro que, en dependencia de su valor, permite de una manera exacta y precisa establecer y evaluar la calidad del hormigón antes de ser sometido a condiciones medioambientales de exposición, fundamentalmente a la atmósfera. De ahí, que como primer objetivo de esta investigación, se cuestiona si la resistencia a compresión del hormigón es un parámetro necesario y suficiente para establecer el desempeño por durabilidad del mismo antes de ser usado en la construcción de estructuras sometidas al clima tropical costero del Ecuador.

El coeficiente de absorción capilar de un material puede ser determinado midiendo su permeabilidad ante la acción del aire y determinados gases, pero el método no permite tener una idea cuantificada del número, tamaño y distribución de los poros en la matriz. En materiales porosos, especialmente en hormigones, hubo un tiempo en que llegó a convertirse quizás en el único parámetro medible directo, responsable de la durabilidad y vida útil.¹²⁻¹⁴ Pero posteriormente se demostró que, los ensayos de permeabilidad en un hormigón sometido a gases fueron muy sensibles, debido fundamentalmente al método de acondicionamiento de las probetas. En particular, la humedad en el interior de las probetas afectó la obtención de los coeficientes de absorción capilar.^{15, 16}

La técnica de intrusión de mercurio, ha causado derrame y chorreado del mismo a la hora de aplicarlo a presión en las probetas de hormigón. Los resultados permitieron concluir que no fue factible para la determinación del porcentaje de porosidad capilar, principalmente en hormigones muy porosos.¹⁷⁻²⁰

Por otra parte, el ensayo de penetración del agua sometida a presión (UNE-EN 12390-8) tampoco ha resultado factible para la determinación de la permeabilidad, sobre todo en hormigones muy compactos.²¹⁻²⁴

Todo lo anterior trajo la necesidad de usar otras metodologías y ensayos capaces de obtener resultados más confiables en relación con la porosidad efectiva en el hormigón, a través de la determinación del porcentaje de porosidad capilar. Estos se basan en la absorción capilar de agua u otros solventes, principalmente orgánicos de muy baja densidad, capaces de penetrar en la matriz porosa del hormigón.

La medición de la permeabilidad a través de la determinación del porcentaje de porosidad capilar fue probada. En tres casos, se procedió a la saturación de muestras cilíndricas de hormigón en tres condiciones diferentes: en agua a temperatura ambiente; bajo condiciones de ebullición (ASTM C-642); y al vacío (ASTM C-1202).^{25, 26} Sin embargo, los resultados demostraron que no hubo diferencias significativas entre los valores de porcentaje de porosidad capilar determinado bajo las tres condiciones. La saturación al vacío garantizó el llenado continuo de agua en los poros, permitiendo obtener valores mayores. Sin embargo, se ha demostrado que la técnica de vacío es perturbativa, por lo que sus resultados no son totalmente confiables. Se demostró también a partir de la técnica de microscopia electrónica de barrido (MEB) que, bajo condiciones de ebullición, el incremento de la temperatura del agua ejerció una fuerte influencia en la deformación del diámetro de los poros capilares, influyendo también en la obtención de valores erróneos del porcentaje de porosidad capilar.²⁷⁻²⁹

Por otra parte, se realizó una comparación entre el método gravimétrico para la determinación de la velocidad de absorción de agua (ASTM C-1585) y una metodología que permite medir la altura del frente del líquido con el incremento de la raíz cuadrada del tiempo.³⁰ La técnica usada fue la radiografía de neutrones en muestras de hormigón, utilizando etilenglicol a modo de solvente, compuesto químico que no reacciona con el gel del cemento y que constituye uno de los elementos más importante a la hora de realizar el montaje de estos ensayos de absorción capilar. De ahí a que el agua, que no solo por su baja densidad (1000 kg/m^3), haya sido el solvente más seleccionado. Sin embargo, los valores del coeficiente de absorción capilar determinados por ambos métodos también fueron muy diferentes y no se correspondieron con el porcentaje de porosidad capilar determinado a partir de la técnica de intrusión de mercurio.³¹ Ambos métodos, no condujeron a la determinación del porcentaje de porosidad capilar como parámetro fundamental en la evaluación de la calidad del hormigón. Además, la adquisición y montaje de la tecnología para la técnica de la radiografía neutrónica resultó ser sumamente compleja y costosa.

Una metodología muy sugerida por la literatura internacional es la establecida por Fagerlung en 1986, basada en la absorción capilar de agua en función del tiempo y el área circular de la probeta de hormigón en contacto con el agua. Según ella, a partir de una relación entre el coeficiente de absorción capilar y la resistencia a la penetración del flujo de agua, se obtienen los valores de porcentaje de porosidad capilar.³²

El cálculo de la porosidad efectiva a partir de la determinación del porcentaje de porosidad capilar en el hormigón, antes de usarlo en las construcciones emplazadas en climas tropicales según el método de Fagerlung sobre todo costeros, no ha sido muy valorada en el perfil costero del Ecuador.

De forma general, este aspecto puede constituir una de las razones principales de la falta de criterios por durabilidad y vida útil en la normativa de la construcción en el país, por lo que como parte de la presente investigación se viene desarrollando en la actualidad, un estudio dirigido a la obtención de una metodología que permita construir las estructuras de hormigón armado en perfiles costeros con criterios de durabilidad y vida útil.

Además de incrementar la durabilidad y vida útil, se garantizará alargar el tiempo de los costosos trabajos de mantenimiento y sobre todo, los de reparación de las estructuras, permitiendo la selección adecuada de los sistemas primarios y secundarios de protección. Forma parte también del estudio, la evaluación de la agresividad ambiental del litoral costero de Manabí, de lo que ya se tienen resultados novedosos. Más, si se tiene en cuenta que las zonas costeras se identifican como de elevado potencial constructivo debido al incremento de la industria del turismo, sobre todo en países con climas tropicales costeros como es el caso del Ecuador.³³

La mayoría de las investigaciones basadas en la determinación del porcentaje de porosidad capilar a partir de la metodología establecida por Fagerlund, se han ejecutado usando agua potable en diferentes diseños de mezclas de hormigón. Esta experiencia ha sido ejecutada en varios países de la región Iberoamericana como Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, México, Costa Rica, España, Uruguay, Portugal de acuerdo con el proyecto DURACON y Cuba, quedando ausente el Ecuador.^{34, 35}

Entonces, como segundo objetivo fundamental de esta investigación, se pretende comparar los valores de porcentaje de porosidad capilar para un mismo diseño de mezcla, pero variando el tipo de agua a la que estarán sometidas las probetas de hormigón. En este caso se emplea agua de mar de tres zonas del perfil costero perteneciente a los cantones (municipios) de Crucita, La Boca y San Jacinto, así como el agua potable del cantón de Portoviejo, todos pertenecientes a la provincia de Manabí, Ecuador. El tipo de hormigón estudiado es el típico usado en las construcciones de las estructuras en el perfil costero del Ecuador, sobre todo en las zonas costeras de Manabí.

Por último, el tercer objetivo, se basa en evaluar el nivel de corrosividad de las aguas tomadas en el perfil costero de Manabí a partir de la determinación del índice de saturación de Langelier. Más si se tiene en cuenta que gran parte de los pilotes, columnas, vigas de enlaces y otros elementos estructurales de obras emplazadas en zonas costeras, ya sea en condiciones de bahías, estuarios o mar abierto, además de estar expuestas a las condiciones de exposición atmosférica, están sometidas al efecto de los cambios de marea, la salpicadura y la inmersión total en el agua de mar.³⁶

Está demostrado que, las condiciones más agresivas no solo para el hormigón armado sino también para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, son las zonas de salpicadura y de marea, no sucediendo lo mismo para la condición de inmersión total en el agua de mar.³⁷

Como ejemplo de estructuras que presentan los primeros síntomas de deterioro en las zonas de salpicadura y marea se encuentran las vigas de enlace del puente "Los Caras" que une Bahía de Caráquez del cantón Sucre con la ciudad de San Vicente del cantón de su propio nombre. Ambos pertenecientes a la provincia de Manabí (Fig. 1 a) y b).

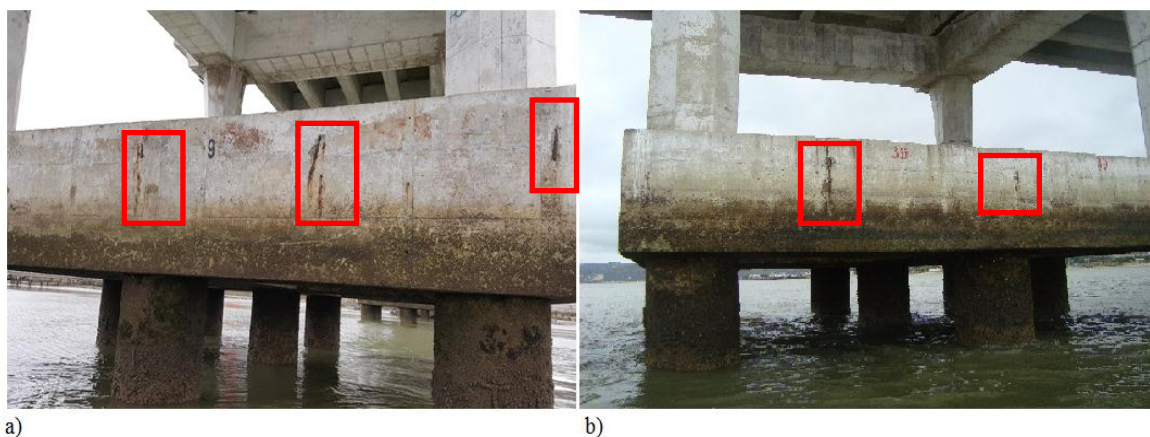


Fig.1. Vigas de enlace 9 y 39 del puente "Los Caras". Se observan las zonas de marea y salpicaduras afectadas por el fenómeno de la corrosión en los aceros de refuerzo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón fue realizada a partir de la metodología descrita en la normativa ACI-211.³⁸ Las características del hormigón obtenido son mostradas (Fig. 2).

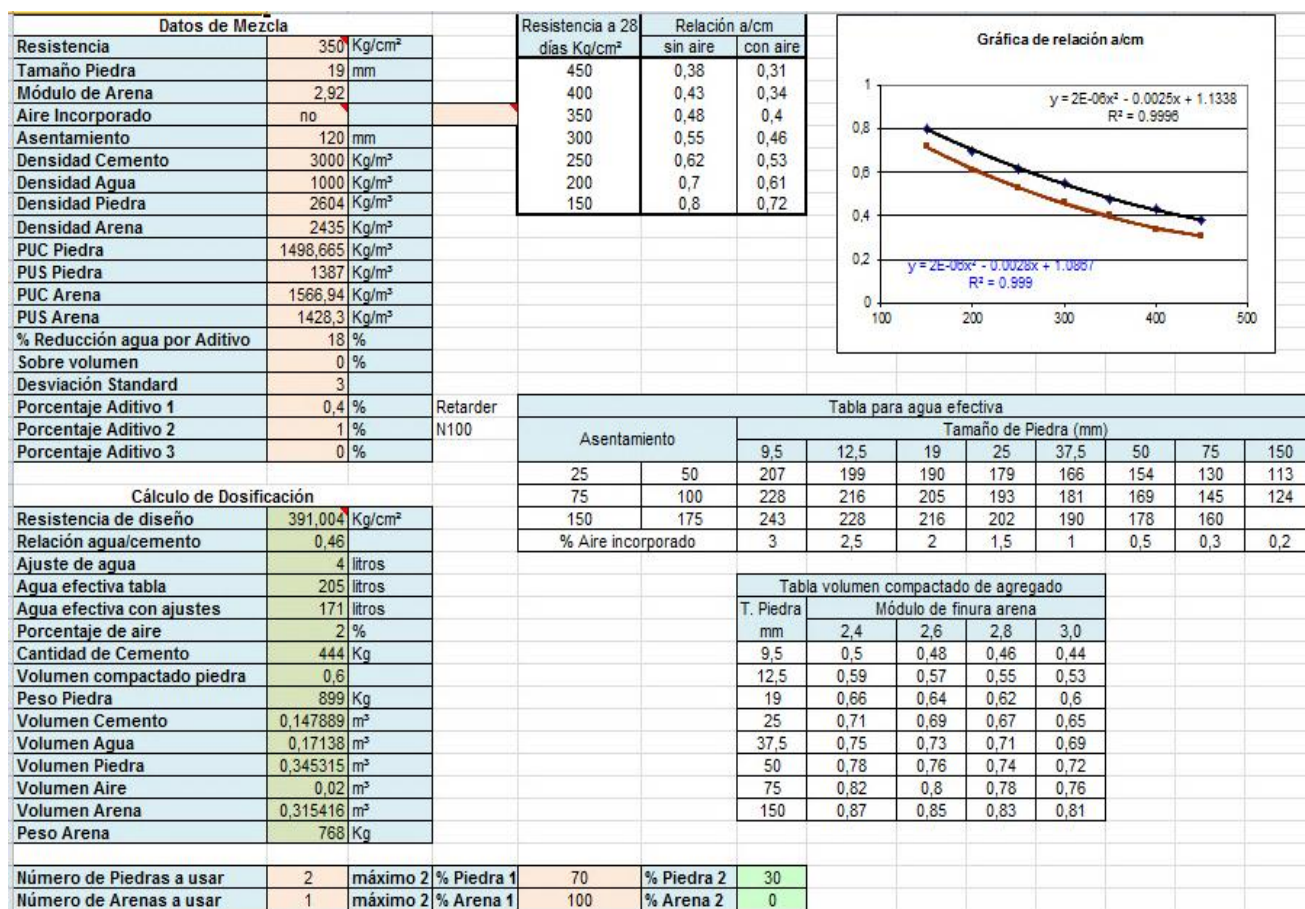


Fig. 2. Metodología según la normativa ACI-2011 que describe el diseño de mezcla usado en la elaboración del hormigón objeto de estudio.

Este diseño de mezcla con relación agua/cemento de 0,46 es muy empleado en la construcción de estructuras costeras del Ecuador, principalmente en la provincia de Manabí.

El asentamiento en el cono de Abrams muestra que se está en presencia de una mezcla de consistencia fluida, es decir de una buena laborabilidad (Fig. 2).

La procedencia de los materiales usados fue la siguiente:

- Cemento portland P-350 de la fábrica HOLCIM. Provincia de Guayaquil.
- Como árido fino, arena lavada de la cantera MEGAROK® del cantón Picoazá. Provincia de Manabí.
- Como árido grueso, gravilla de grado A de 19 mm de tamaño máximo nominal de la cantera MEGAROK® del cantón Picoazá. Provincia de Manabí.
- Aditivo SIKAMENT® - N 100, reductor de agua de alto rango (entre un 20 a un 25 % de agua).

Determinación de la resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón (R_{bk}), se elaboraron nueve probetas cilíndricas de 200 mm de altura x 100 mm de diámetro. De acuerdo con los requerimientos exigidos en la normativa de la especialidad, el diámetro debe ser por lo menos tres veces superior al tamaño máximo nominal del agregado grueso (ASTM C39), lo que se cumple en este caso.³⁹

Se determinaron tres valores de resistencia a compresión a tiempos de curado de 7, 14 y 28 d, con inmersión total en agua potable a temperatura de 25 ± 2 °C.⁴⁰ Los valores de resistencia a compresión (MPa) fueron obtenidos en una máquina de ensayo marca PILOT de fabricación italiana, con fuerza máxima de compresión axial de 2000 kN. Los valores de resistencia a compresión (R_{bk}) a tiempo de curado de 28 d, sirvieron para la clasificación del hormigón en cuanto a su desempeño por durabilidad.

Determinación del porcentaje de porosidad capilar por absorción de agua

El porcentaje de porosidad capilar (P_c) se determinó en correspondencia con la metodología de Göran Fagerlund.³² Para ello, es necesario obtener la resistencia a la penetración del flujo de agua (m) y el coeficiente de absorción capilar (k).

En total se realizaron 16 ensayos con el propósito de determinar los valores de porcentaje de porosidad capilar (cuatro para cada muestra de agua de las zonas costeras) en 16 probetas cilíndricas de hormigón de relación agua/cemento 0,46. De acuerdo con la metodología, cada muestra debe tener un espesor menor que 50 mm⁴¹ y fueron sometidas a un tiempo de curado de 28 d a inmersión completa en agua potable en el mismo tanque de curado, luego de lo cual se realizó el corte a espesores de 50 mm para obtener las cuatro muestras por probetas. El corte se efectuó con una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT de fabricación estadounidense.

Pasados los 28 d, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado hasta peso constante en un horno de laboratorio UNB-400 de fabricación alemana de marca MENMERT a una temperatura de 50 °C, dirigido a garantizar la pérdida total del agua evaporable que se encuentra en los poros del hormigón.

Después de extraídas del horno, las muestras fueron sometidas a un proceso de enfriamiento en desecadoras. Las zonas laterales curvas fueron recubiertas con parafina con el propósito de que el flujo de absorción capilar tuviera lugar solamente por el área circular expuesta directamente al agua, procediendo entonces a efectuar las pesadas iniciales (W_0 en g) en una balanza analítica marca ADAM, de fabricación colombiana de peso máximo 4 100 g, y precisión de 0,01 g.

Seguidamente, se colocaron las muestras en el interior de cuatro cubetas plásticas (una cubeta para cada tipo de agua) sobre un soporte polimérico, quedando libre el contacto entre el área circular inferior de la probeta y el agua. Se tuvo cuidado que el nivel del agua no sobrepasara los 5 mm por encima de la superficie inferior de cada probeta. Las cubetas permanecieron tapadas para evitar la evaporación del agua y se garantizó que la temperatura del local donde se ejecutó el ensayo fuera de 20 °C.

Las pesadas posteriores de las muestras (W_t en g) colocadas en contacto con el agua fueron ejecutadas a tiempos de 5, 10, 15, 30 min, 1, 2, 3, 4, 6, 24 y 48 h contadas siempre desde el inicio del ensayo, verificando el tiempo en que las muestras alcanzaron el estado máximo de saturación del agua. Se trata del tiempo requerido (t) para que el flujo de agua ascienda hacia la cara superior de la muestra de hormigón.

A partir de ese tiempo, el peso de las muestras comienza a mantenerse constante, tomándose para el cálculo de la resistencia a la penetración del flujo capilar de agua (m) según la expresión:

$$m = \frac{t}{z^2} (s/m^2) \quad (1)$$

Donde z es el espesor de la muestra.

El coeficiente de absorción capilar se calcula de acuerdo con la expresión:

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}} (g/m^2 s^{1/2}) \quad (2)$$

Donde A es el área de la zona circular (0,008 m²) que permaneció en contacto directo con el agua.

La metodología establece que el valor del coeficiente de absorción capilar (k) debe ser obtenido a través del cálculo de la pendiente de la zona lineal de la recta en el gráfico $(W_t - W_0)/A$ en función de $\sqrt{t}$.⁴¹

El porcentaje de porosidad capilar (P) representativo de la porosidad efectiva en las 16 muestras, fue calculado según la expresión:

$$P = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%) \quad (3)$$

Este factor fue clasificado de acuerdo con las especificaciones establecidas en la RED DURAR de CyTED (Tabla 1)⁴¹

Tabla 1. Clasificación de los valores de porcentaje de porosidad capilar.

Porcentaje de porosidad capilar (%)	Calidad del hormigón
< 10	Buena calidad y compacidad
10 - 15	Moderada calidad
> 15	Durabilidad inadecuada

Determinación del índice de saturación de Langelier

El índice de saturación de Langelier (ISL) es usado para calcular el carácter incrustante debido a la saturación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o corrosivo del agua. Se relaciona con los diversos equilibrios en el agua del anhídrido carbónico, bicarbonato-carbonatos, el pH, la temperatura, la concentración de calcio y la salinidad total. De ahí, a que sirva para determinar el índice de corrosividad de las aguas naturales divididas en dos grandes grupos: las aguas dulces (ríos, lagos, embalses, subterráneas provenientes de manantiales, agua de lluvia) y el agua de mar. A esta última se encuentran expuestas la mayoría de las estructuras de hormigón armado del perfil costero de Manabí.⁴²

Para la determinación de este índice, se utilizaron los números del uno al tres como referencia a las muestras de agua tomadas en las zonas costeras, correspondiendo (1) al cantón de Crucita; (2) a La Boca; y (3) a San Jacinto. Las tres zonas ubicadas en el perfil costero de la provincia de Manabí, Ecuador. Fue necesario en todos los casos obtener la temperatura, la dureza, la alcalinidad y el pH en las tres muestras del agua de mar (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros obtenidos de las tres muestras del agua de mar para la determinación del índice de Langelier.

Muestra de agua	Temperatura (°C)	Dureza			Alcalinidad		
		EDTA (mL)	Dureza (mg/l)	Dureza (ppm)	0,02N (mL)	Alcalinidad (g)	Alcalinidad (ppm)
1	27,7	7	4,2	42,0	1	20,0	200,0
2	27,7	7	4,2	42,0	0,2	4,00	40,0
3	27,7	7	4,2	42,0	0,3	6,00	60,0

El índice de saturación de Langelier fue calculado de acuerdo con la expresión (4) y haciendo uso de los valores para cada uno de los factores que componen la expresión: ⁴² (Tabla 3).

$$ISL = pH + TF + HF + AF - 12,5 \quad (4)$$

Tabla 3. Valores de los factores que componen la expresión de cálculo del índice de saturación de Langelier en dependencia de la temperatura, dureza y alcalinidad del agua.

Temperatura		Dureza		Alcalinidad	
°C	TF	ppm	HF	ppm	AF
0	0,0	5	0,7	5	0,7
4	0,1	25	1,4	25	1,4
8	0,2	50	1,7	50	1,7
12	0,3	75	1,9	75	1,9
16	0,4	100	2,0	100	2,0
20	0,5	150	2,2	150	2,2
24	0,6	200	2,3	200	2,3
28	0,7	250	2,4	250	2,4
32	0,7	300	2,5	300	2,5
36	0,8	400	2,6	400	2,6
40	0,9	500	2,7	500	2,7
50	1,0	1 000	3,0	1 000	3,0

El pH fue determinado haciendo uso de un equipo medidor marca FIVEASY-METTLER TOLEDO de fabricación china. La temperatura empleando un termómetro de mercurio calibrado y verificado en el momento de tomar las tres muestras de agua.⁴³ La dureza fue determinada teniendo en cuenta la metodología de dureza total de calcio y magnesio en aguas superficiales, subterráneas, de mar y efluentes industriales.⁴⁴ La alcalinidad (mg/L CaCO_3) haciendo uso de la metodología exigida para su determinación en las mismas aguas mencionadas anteriormente.⁴⁵

A partir de la expresión (4), para la obtención de cada uno de los factores dependientes de la temperatura (TF), la dureza (HF) y la alcalinidad (AF) fue necesario interpolar los valores de acuerdo con la expresión (5):

$$y_x = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} * (y_1 - y_0) \quad (5)$$

El nivel de incrustación o corrosividad de las tres muestras de agua fue clasificado de acuerdo con los valores calculados del índice de Langelier (Tabla 4).⁴²

Tabla 4. Indicaciones de los índices de incrustación o corrosividad de las aguas en dependencia de los intervalos de clasificación del índice de saturación de Langelier.

ISL	Indicación
- 2,0 < ISL < -0,5	Corrosión severa
-0,5 < ISL < 0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL = 0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0 < ISL < 0,5	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
0,5 < ISL < 2	Formación de incrustaciones, pero no corrosiva

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la resistencia a compresión

Es de notar, un incremento de la resistencia a compresión del hormigón en función del tiempo de curado, sobre todo a partir de los siete días a inmersión total en agua potable (Fig. 3).

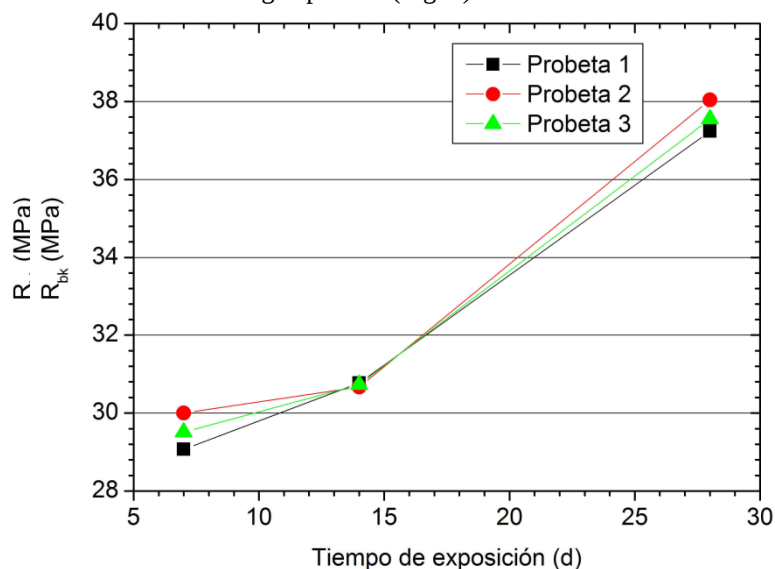


Fig. 3. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado.

El experimento permitió determinar el tiempo crítico de curado a partir del cual comienza a incrementarse la resistencia a compresión (Fig. 4). Para esto, fue necesario realizar el ajuste de un modelo estadístico matemático basado en una función exponencial creciente ($R_{bk} = R_{bk0} + e^{x/t}$), indicando el parámetro estadístico t basado en el tiempo de curado a partir del cual la resistencia a compresión se incrementó.

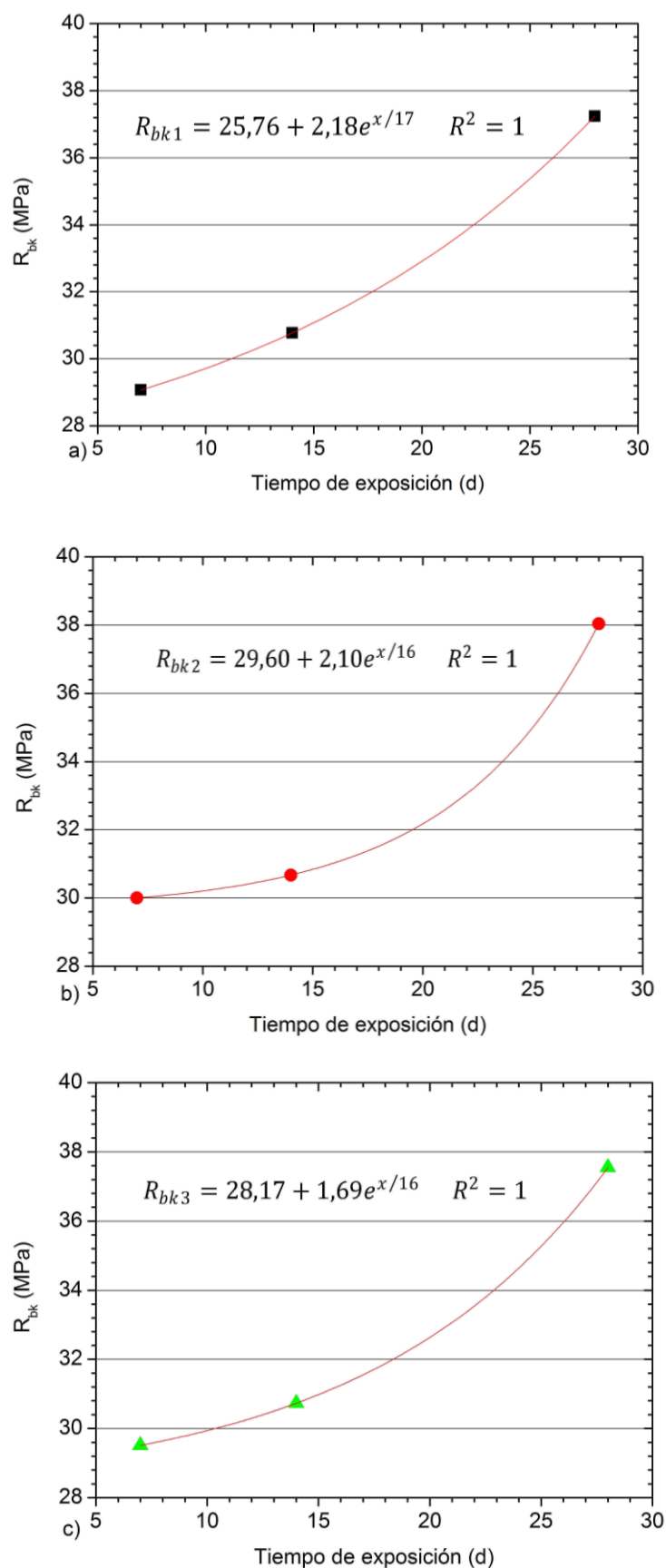


Fig. 4. Modelos estadísticos ajustados basados en una función exponencial creciente en el comportamiento de la resistencia a compresión en función del tiempo de curado

Es de notar de acuerdo con el ajuste, como la resistencia a compresión en el hormigón se incrementa a un intervalo de tiempo entre 16 y 17 d de curado, momento a partir del cual la resistencia a compresión del hormigón alcanza un valor superior a los 30 MPa. Esto significa que, a partir de ese valor y en dichos tiempos de curado, la resistencia a compresión se incrementó (Fig. 4). De ahí, la imperiosa necesidad de garantizar el curado hasta los 28 d, siempre con el propósito de obtener hormigones más compactos y homogéneos, en otras palabras, más durables.

Sería recomendable obtener este tiempo crítico para los diferentes diseños de mezclas en el hormigón usado en las construcciones de las estructuras sometidas al clima tropical costero del Ecuador.

Por otra parte, los valores de resistencia a compresión superiores a 35 MPa indican la obtención de hormigones de calidad, adecuados para el clima tropical costero del Ecuador, según la normativa de durabilidad establecida en el país.¹⁰ También, de acuerdo con lo establecido en la RED DURAR del CyTED, los valores promedio de resistencia a compresión por encima de 20 MPa, indican buena calidad y adecuada durabilidad antes de someterlo a condiciones reales de exposición.⁴¹

Los valores de resistencia a la compresión inicial ($R_{b,0}$) a bajos tiempos de curado parten de un valor superior a 25 MPa (Fig. 4). Esto constituye un criterio adecuado en el desempeño por durabilidad en este tipo de hormigón usado en las construcciones sometidas al clima tropical costero del Ecuador.

Independiente de todo ello, para establecer el desempeño por durabilidad en el hormigón no basta solo con el criterio de resistencia a compresión a los 28 d de curado en inmersión total en agua potable, sino que es necesario además obtener el tiempo de curado a partir del cual comienza a incrementarse la resistencia, así como el valor inicial de ésta.

Análisis del porcentaje de porosidad capilar

De acuerdo con los valores promedios de porcentaje de porosidad capilar obtenidos frente al agua de mar de Crucita, La Boca y San Jacinto, se está ante un hormigón de buena calidad y compacidad, según los rangos de clasificación establecidos en la RED DURAR de CyTED (Tabla 5). Sin embargo, es de apreciar un cambio brusco en cuanto a los valores de porcentaje porosidad capilar obtenido frente al agua potable de Portoviejo, superior al 15 %, lo que indica un hormigón de durabilidad inadecuada (Tabla 5).

Tabla 5. Resistencia a la penetración del flujo de agua (m), coeficiente de absorción capilar (k) y porcentaje de porosidad capilar (P) obtenido en las muestras de hormigón.

Zona de estudio	m (s/m ²)	k (g/m ² s ^{1/2})	P (%)	Calidad del hormigón
Crucita 1	29 390 945	0,015 8	8,56	Buena calidad y compacidad
Crucita 2	37 703 633	0,016 0	9,82	
Crucita 3	31 540 026	0,013 7	7,69	
Crucita 4	40 960 080	0,010 6	6,78	
Promedios	34 898 671	0,014 2	8,21	
La boca-1	52 624 086	0,006 2	4,49	Buena calidad y compacidad
La boca-2	36 129 533	0,011 5	6,91	
La boca-3	44 419 597	0,012 7	8,46	
La boca-4	45 289 825	0,014 3	9,62	
Promedios	44 615 760	0,011 4	7,37	
San Jacinto 1	42 707 040	0,011 4	7,44	Buena calidad y compacidad
San Jacinto 2	65 658 177	0,010 3	8,36	
San Jacinto 3	46 168 495	0,012 5	8,52	
San Jacinto 4	45 484 001	0,014 2	9,57	
Promedios	52 504 428	0,014	8,47	
Portoviejo 1	49 759 260	0,024 1	17,02	Durabilidad inadecuada
Portoviejo 2	51 685 709	0,025 5	18,40	
Portoviejo 3	57 433 645	0,019 7	14,99	
Portoviejo 4	47 052 906	0,027 1	18,63	
Promedios	51 482 879	0,024 1	17,13	

Evidentemente, al poseer el agua de mar una densidad ligeramente superior que el agua potable ($\approx 1\,027\text{ kg/m}^3$), existe la posibilidad de una penetración menor a través de los poros capilares del hormigón. No obstante, cabe pensar como un resultado preliminar que, el menor deterioro debido a la corrosión en los aceros de refuerzo en las partes de las estructuras de hormigón armado sometidas a inmersión total en el agua de mar (pilotes como es el caso de los puentes) no solo pudiera deberse al efecto de la solubilidad casi total del oxígeno y de los iones cloruro en el agua de mar. Es necesario tener en cuenta también, la menor penetración en comparación con el agua potable, a pesar de tratarse de un hormigón de resistencia a compresión por encima de los 35 MPa a los 28 d de curado.

De esta forma, no debe alcanzarse una concentración crítica de iones cloruro soluble capaz de iniciar y desarrollar el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Por tanto, no solo basta con la determinación de la resistencia a compresión a la hora de someter un hormigón frente al agua de mar y potable. Se hace muy necesario también, la determinación del porcentaje de porosidad capilar como una herramienta más suficiente en el desempeño por durabilidad.

Sería recomendable confirmar este resultado como un criterio de durabilidad, pero con un mayor número de muestras de hormigón. Por otra parte, la penetración baja del agua de mar pudiera conducir también a la no ocurrencia del fenómeno de la eflorescencia en las partes de las estructuras sometidas a condiciones de inmersión parcial y hacia la atmósfera.

La diferencia en cuanto a los valores de porosidad efectiva se demuestra al observar las cuatro curvas de absorción capilar para cada una de las muestras de hormigón sometidas a las dos aguas, es decir la de mar y la potable (Fig. 5). Se aprecia una mayor inclinación en la absorción capilar para las cuatro muestras de hormigón sometidas al agua potable de Portoviejo. De esta forma, se obtiene un menor tiempo de saturación, representado por el intercepto entre la parte inclinada y la lineal.

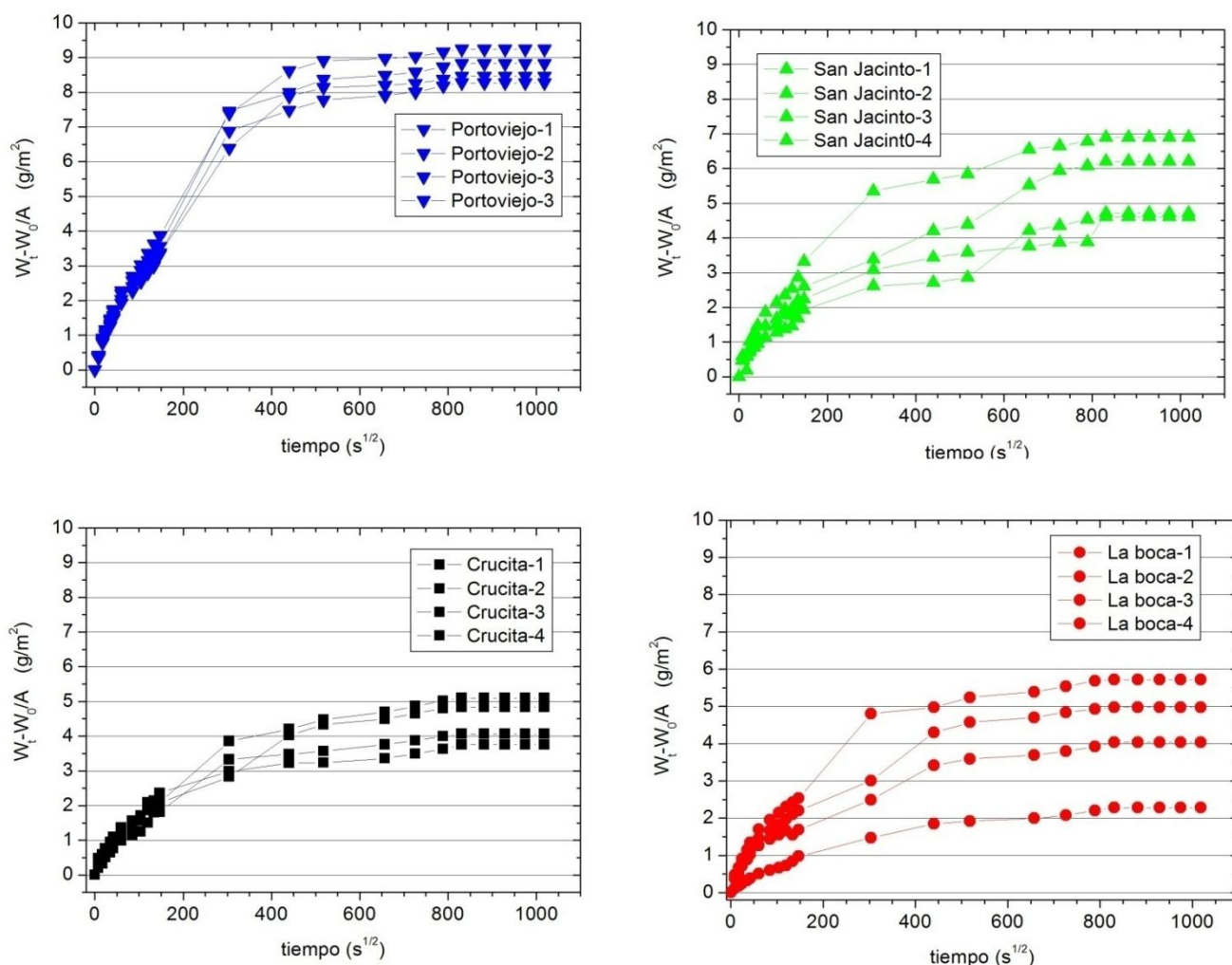


Fig. 5. Curvas de absorción capilar donde se demuestra la diferencia en cuanto a la penetración del flujo de agua en las muestras de hormigón.

Esto indica una menor resistencia a la penetración del flujo de agua (m) y un mayor coeficiente de absorción capilar (k), lo que trae como resultado un porcentaje de porosidad capilar mayor. En otras palabras, una permeabilidad mayor (Tabla 5).

Se infiere además que, la permeabilidad no solo depende del porcentaje de porosidad capilar del hormigón, sino que debe pensarse también en el tipo de agua a que estará sometido bajo la condición total de inmersión. Es de apreciar un comportamiento muy similar de la absorción capilar en las muestras sometidas al agua de mar (Fig. 5), además de una dependencia lineal entre los valores del coeficiente de absorción capilar y el porcentaje de porosidad capilar para un mismo diseño de mezcla de hormigón, pero sometido a los dos tipos de agua (Fig. 6 a).

El ajuste del modelo estadístico matemático se basó también en una función exponencial creciente ($k = Ae^{P/t}$) (Fig. 6 b). En este caso el valor de t representa el porcentaje de porosidad capilar (P) a partir del cual comienza a incrementarse el coeficiente de absorción capilar, es decir la penetración del flujo de agua, la permeabilidad. Se observa, como este parámetro estadístico (t) alcanzó un valor de 9,49 correspondiendo al porcentaje de porosidad capilar donde la penetración del flujo de agua se incrementó (Fig. 6 b). Por tanto se demuestra que, a la hora de someter un hormigón de un mismo diseño de mezcla a diferentes tipos de agua (potable y de mar), es necesario que el mismo no solo presente una resistencia a compresión por encima de 35 MPa, sino también que debe poseer un porcentaje de porosidad capilar inferior al 10 % para de esta forma garantizar el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón antes de ser sometido a la condición de exposición a inmersión a diferentes tipos de agua.

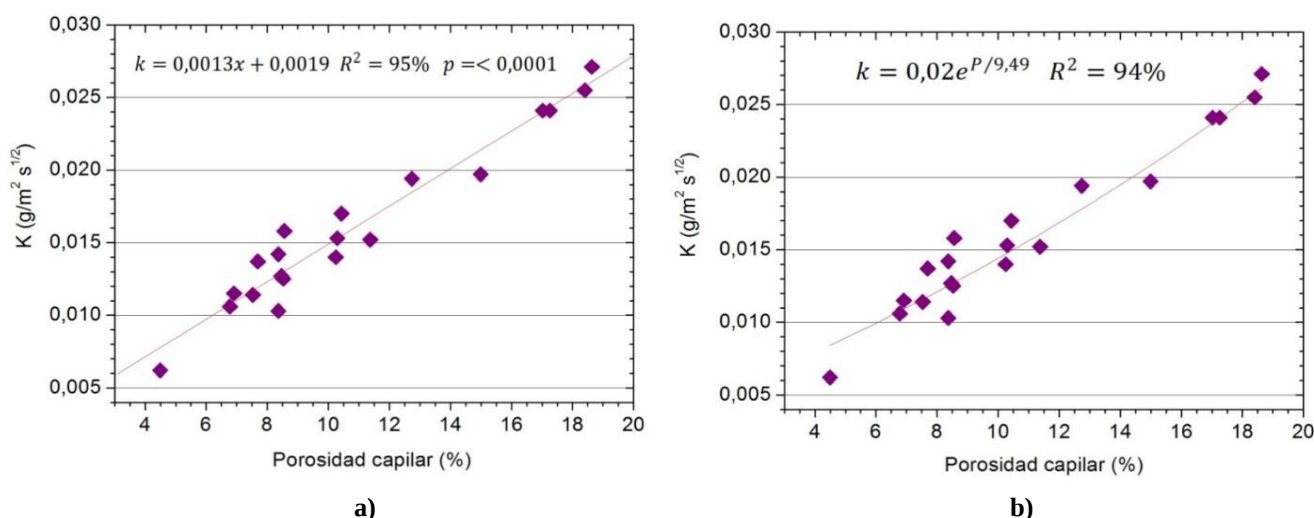


Fig. 6. a) Comportamiento lineal entre los valores del coeficiente de absorción capilar y la porosidad capilar. b) Se nota el ajuste de un modelo basado en una función exponencial creciente

El ajuste del modelo referido anteriormente basado en una función exponencial creciente, fue tenido en cuenta también en un estudio investigativo basado en la evaluación de la calidad del hormigón antes de construir estructuras sometida a condiciones medioambientales de exposición en el clima tropical costero de Cuba. En este caso el valor de t sin variar el tipo de agua pero si la dosificación del hormigón para tres relaciones agua/cemento (0,4; 0,5 y 0,6) fue de 8,49, es decir, inferior también a 10 %. Este resultado se correspondió con la obtención de un hormigón de relación agua/cemento 0,4 de coeficiente de absorción capilar $k = 0,0028 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ y resistencia a compresión de 35 MPa.^{46,47} Este tipo de hormigón ha demostrado una durabilidad muy adecuada bajo condiciones de muy elevada (C5) y extrema (CX) agresividad corrosiva de la atmósfera en el clima tropical costero de Cuba. De esta forma se continúa demostrando la necesidad de elaborar hormigones de porcentaje de porosidad capilar inferiores al 10 %.¹¹

Comportamiento del Índice de Langelier

Se aprecia de acuerdo con los intervalos de clasificación (Tabla 4), que las aguas de mar de Crucita y San Jacinto presentan una corrosión o corrosividad leve, pero sin formación de incrustaciones.

Sin embargo, el agua de mar correspondiente a La Boca indica una corrosión severa para las estructuras (Fig. 7).

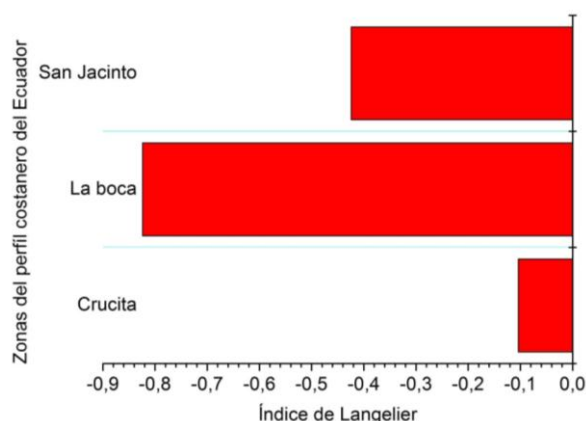


Fig. 7. Comportamiento del Índice de Langelier para las muestras de aguas obtenidas en el perfil costanero de Manabí, Ecuador.

La diferencia de los niveles de corrosividad de las aguas de mar debe ser tomada en cuenta a la hora de diseñar y proyectar las estructuras que se pretenden construir, a pesar de haberse demostrado la baja penetración que pudiera poseer el agua de mar en un diseño con relación agua/cemento de 0,46. No obstante, hay que pensar en las zonas de marea y salpicadura donde la determinación del índice de corrosividad de las aguas del mar juega un papel muy importante en el desempeño por durabilidad en el hormigón.

A pesar de que en este estudio no se tuvo en cuenta el índice de corrosividad del agua del estuario donde se encuentra el puente referido (Fig. 1 a y b), se determinaron tres valores del índice de Langelier en muestras de aguas próximas a las vigas de enlace 12, 24 y 36, con valores de - 0,37, - 0,29 y - 0,46 respectivamente. Esto indica la existencia de un agua de corrosividad leve, pero sin formación de incrustaciones.

Es de apreciar la existencia del deterioro por corrosión en los aceros de refuerzo en las zonas de marea y salpicaduras en dicho puente (Fig. 1 a y b), lo que confirma la necesidad de conocer el índice de corrosividad de las aguas.

En las investigaciones realizadas, basadas en el desempeño por durabilidad del hormigón sometido a climas tropicales costeros de Iberoamérica (Proyecto DURACON), este importante indicador no se ha tenido en cuenta.^{34,35}

CONCLUSIONES

Se confirma que, la resistencia a compresión es un parámetro necesario, pero no suficiente antes de usar este apreciado material de la construcción en las estructuras que serán sometidas al clima tropical costero del Ecuador. Es necesario, además, la determinación de la porosidad efectiva a través del porcentaje de porosidad capilar como un criterio más profundo a la hora de establecer el desempeño por durabilidad en el hormigón.

El incremento de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado permitió confirmar la necesidad de curar el hormigón hasta los 28 d en inmersión total en agua potable.

Se demuestra también como un resultado preliminar que, al someter un hormigón a dos tipos de agua (mar y potable), dosificado a una misma relación agua/cemento, se obtienen diferentes valores de porcentaje de porosidad capilar independiente de la resistencia a compresión, lo que permite inferir que la calidad del hormigón varía en dependencia del tipo de agua al que será expuesto.

Se continúa demostrando la necesidad de obtener hormigones con un porcentaje de porosidad efectiva inferior al 10 %, con el propósito de incrementar la durabilidad y vida útil de las estructuras.

La determinación del Índice de Langelier en las muestras de aguas de mar permitió demostrar que, la diferencia de los niveles de corrosividad de las aguas de mar, debe ser tomada en cuenta a la hora de diseñar y proyectar las estructuras que se pretenden construir, sobre todo los puentes en el perfil costero de Manabí, Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification determination and estimation.
2. Chen YY, Chung SC, Shih HC. Studies on the initial stages of zinc atmospheric corrosion in the presence of chloride. *Revista Corrosion Science*. 2006; 35(6): pp 345 - 55.
3. De la Fuente D, Otero-Huerta E, Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion mild steel. *Revista Corrosion Science*. 2011; 49 (2): pp. 604 - 617.
4. Fitzgerald K P, Nairn J, Skennerton G, Atrens A. Atmospheric corrosion of copper and the colour, structure and composition of natural patinas on copper. *Revista Corrosion Science*. 2006; 35 (3): pp. 2480 - 2509.
5. Vera R, Delgado D, Araya R, Puentes M, Guerrero I, Rojas P, *et al.* Construcción de mapas de corrosión atmosférica de Chile. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 2012; 32 (2): pp. 269 - 76.

6. Veleza L, Acosta M, Meraz E. Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff. *Revista Corrosion Science*. 2009; 51 (3): pp. 2055–2062.
7. 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*. 2012; 11 (3): pp. 49-61.
8. Castañeda A, Corvo F, Howland JJ, Pérez T. Corrosion of steel reinforced concrete in tropical coastal atmosphere of Havana City. *Revista Química Nova*. 2013; 36 (2): pp. 220-229.
9. Castañeda A, Corvo F, Howland, JJ. Pérez, T. Atmospheric corrosion of reinforced concrete steel in tropical coastal regions. *Revista Engineering Journals*. 2013; 17 (2), pp. 1-18.
10. Norma Ecuatoriana de la Construcción-NEC 2015. NEC-SE-HM. Estructuras de hormigón armado.
11. Castañeda A, Corvo F, Howland J J, Marrero R, Fernández, D. Atmospheric corrosion on steel reinforced concrete in a coastal city located in a tropical island. En: *Reinforced Concrete: Design, Performance and Applications*, editor. Nova Science Publishers. USA.2017. ISBN 978153610753: (2017) Chapter. 4. pp. 109-158.
12. Alshamsi A M, Hassan D A. Development of a permeability apparatus for concrete and mortar. *Revista Cement and Concrete Research*. 2002; 32 (1): pp. 923 - 29.
13. Shi H, Xu B, Zhou X. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Revista Construction and Building Materials*. 2009; 23 (2): pp. 1 980 - 85.
14. Caré S. Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes. *Revista Construction and Building Materials*. 2008; 22 (1): pp. 1 560 - 73.
15. Medina C. Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. *Revista Construction and Building Materials*. 2012; 37 (3): pp. 597-605.
16. Liu J, Agostini F, Skoczylas F. From relative gas permeability to in situ saturation measurements. *Revista Construction and Building Materials*. 2013; 40 (3): pp. 882 - 90.
17. Boundette B, Ringot E, Ollivier J P. Modeling of the transition zone porosity. *Revista Cement and Concrete Research*. 1995; 25 (4): pp. 741-51.
18. Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and proprieties of aerated concrete: A review. *Revista Cement and Concrete Composites*. 2000; 22 (4): pp. 321-29.
19. Kumar R, Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Revista Cement and Concrete Research*. 2003; 33 (2): pp. 155–64.
20. Lian C, Zhuge Y, Beecham S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Revista Construction and Building Materials*. 2011; 25 (4): pp. 4 294 - 98.
21. Yi T, Hyun T, Kim J. The effects of hydraulic pressure and crack width on water permeability of penetration crack-induced concrete. *Revista Construction and Building Materials*. 2011; 25 (4): pp. 2 576-2 583.
22. Yoo J, Lee H, Ismail M. An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure. *Revista Construction and Building Materials*. 2011; 25 (1): pp. 99-108.
23. Das B B, Kondraivendhan B. Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete. *Revista Construction and Building Materials*. 2012; 28 (3): pp. 382 - 86.
24. Qian C. Water seepage flow in concrete. *Revista Construction and Building Materials*. 2012; 35 (2): pp. 491-496.
25. Norma ASTM C 642: 1997. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
26. Norma ASTM C 1202: 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
27. Safiuddin M, Hearn N. Comparison of ASTM saturation technique for measurement the permeable porosity of concrete. *Revista Cement and Concrete Research*. 2005; 35 (4): pp. 1 008 - 13.
28. Bickley J A, Hooton R D, Hover K C. Performance Specifications for Durable Concrete. *Current Practices and Limitations*. *Revista Concrete International USA*. 2006; 23 (2): pp. 12 - 20
29. Bernal S A. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. *Revista Cement and Concrete*. 2012; 42 (4): pp. 1 317 - 26.
30. Norma ASTM C 1585: 2004. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
31. Hanzic L, Kosec L, Anz I. Capillary absorption in concrete and the Luca-Wasburn equation. *Revista Cement and Concrete Composites*. 2010; 32 (1): pp. 84 - 91.
32. Fagerlund G. On the capillarity of Concrete. *Revista Nordic Concrete Research*. 1986; 11 (6): pp. 11 - 25.
33. Guerra Mera J C, Castañeda A, Howland J J. Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador. *Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA*. 2016; 47 (1): pp.17 - 29.

34. Trocónis O. Duracon Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. Revista Building and Environment. 2006; 41, (3): pp. 952 - 962.
35. Trocónis O. Duracon Collaboration. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. Revista Corrosion Science. 2007; 49 (4): pp.2 832-2 843
36. Haque M N, Al-Khaiat H, John B. Climatic zones. A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf. Revista Building and Environment. 2007; 42 (4): pp. 2 410 - 2 416.
37. Nuñez L, Reguera E, Corvo F, González E, Vázquez C. Corrosion of copper in seawater and its aerosol in a tropical island. Revista Corrosion Science. 2005; 47 (2): pp. 461-484.
38. Norma ACI-211:2002. Práctica Estándar para Seleccionar el Proportionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo (ACI 211.1-91). Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto.
39. Norma ASTM C-39:2003. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen.
40. Norma ASTM C-31: 2003. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in the Field.
41. 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.
42. Calidad del agua. Índice de Langelier. [Consultado 27 de marzo del año 2017]. Disponible en: www.hanna.es
43. Norma AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION: 2011. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. Washington, USA. APHA, pp. 4-69.
44. Norma AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION: 2011. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. Washington, USA. APHA, pp. 2-38.
45. Norma ASTM D 1067:2006. Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water.
46. Castañeda A, Howland JJ, Corvo F, Marrero R. Concrete quality assessment before submitting to environmental exposure conditions in Cuba. Revista Acta Microscópica. 2017 Vol. 26, *Supp. A*.
47. Castañeda A, Howland JJ, Corvo F, Marrero R. Concrete quality assessment before building structures submitting to environmental exposure conditions. Revista de la Construcción de Chile. 2017; 16(3): pp.1-17.