EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN ARMADO ANTES DE CONSTRUIR ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CONDICIONES DE ELEVADA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA EN CUBA

A. CASTAÑEDA¹, F. CORVO², J. J. HOWLAND³, R. MARRERO³.

¹ Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Departamento de Protección de Materiales.
Avenida 25 y 158. Apartado Postal 6414. Playa. La Habana Cuba.

² Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Investigaciones de Corrosión.
San Francisco de Campeche. Campeche.

³ Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría CUJAE"

RESUMEN

El objetivo principal del estudio se basó en demostrar como los ensayos de resistencia a la compresión y ultrasonido, son necesarios, pero no suficientes para la evaluación óptima de la calidad del hormigón armado antes de someterlo a condiciones de elevada y muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera principalmente en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Cuba. Por lo que resultó muy necesario conocer el porcentaje de porosidad capilar por dos métodos diferentes, así como el valor crítico de dicho parámetro a partir del cual comienzan a incrementarse la permeabilidad, como criterios más profundos en el establecimiento de su calidad óptima antes de proceder con los trabajos de construcción. Estos criterios fueron demostrados teniendo en cuenta la observación de muestras de pastas de hormigón endurecidas de relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 a partir de la técnica de microscopía electrónica de barrido.

Palabras clave: calidad, hormigón armado, porosidad, permeabilidad, agresividad corrosiva.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad del hormigón armado a partir de diferentes ensayos fisicoquímicos se tiene en cuenta generalmente a la hora de realizar los estudios de diagnóstico a pie de obra, ya sea en el litoral norte de Cuba (Fernández, *et al*, 2001, 2005 y Castañeda, 2012) así como en otras zonas costeras de elevado potencial constructivo en el mundo (Bermúdez, 2007; Castro, *et al*, 2012 y Carvajal, 2012). En ese momento, las estructuras presentan un nivel de deterioro muy avanzado producido por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

Los ensayos fisicoquímicos que más se emplean para establecer la calidad del hormigón armado antes de proceder con la construcción de las obras en zonas costeras de elevada agresividad corrosiva son, la resistencia a la compresión y en escasas ocasiones el ultrasonido. En la mayoría de los casos, no se tiene en cuenta la determinación del porcentaje de porosidad capilar como un indicador directo de la permeabilidad, con el propósito de realizar una evaluación más profunda en la calidad del hormigón armado.

De acuerdo con lo establecido en la RED DURAR de CyTED, hormigones con valores de resistencia a la compresión inferiores a 20 MPa pueden considerarse de baja calidad, siendo indicativo de una durabilidad inadecuada. Para valores de resistencia a la compresión superiores a 45 MPa, pueden valorarse de muy durables (Trocónis, *et al*, 1997).

La norma cubana NC 250:2005 establecía que, para garantizar una elevada durabilidad en el hormigón armado sometido a condiciones de agresividad corrosiva entre elevada (C4) y muy elevada (C5) en atmósferas costeras, la resistencia a la compresión mínima del hormigón no debe ser inferior a 30 MPa. Por otro lado, otros autores han planteado que, la velocidad de pulso ultrasónico obtenida a través del ensayo de ultrasonido es un parámetro fundamental también para confirmar la calidad del hormigón armado como un indicativo de su compacidad y por tanto de su durabilidad (Acebes, *et al*, 2011 y Benmeddour, *et al*, 2012).

Con relación a la evaluación de la permeabilidad en el hormigón, varios métodos han sido utilizados para la determinación del porcentaje de porosidad capilar. La técnica de intrusión de mercurio ha causado derrame y chorreado a la hora de aplicar la presión sobre las muestras, principalmente en hormigones de elevado porcentaje de porosidad capilar (Lian, 2011). Estos autores sugirieron el método basado en la ganancia de agua en función del tiempo y el área de la muestra (Fagerlung, 1986) además de dispositivos sellados al vacío.

Los ensayos en el hormigón sometido a gases y de penetración del agua a presión (UNE-EN 12390-8) no han resultado factibles para la determinación de la permeabilidad. Esto se debe a que no es posible la obtención de los valores de porcentaje de porosidad capilar, según la metodología de ambos ensayos, (Das, 2012 y Qian, *et al*, 2012).

La comparación entre los valores de porcentaje de porosidad capilar obtenida por diferentes métodos, así como la obtención de su valor crítico a partir del cual ocurre un incremento en la permeabilidad del hormigón; constituye una herramienta fundamental para demostrar si los ensayos de resistencia a la compresión y ultrasonido, son necesarios y suficientes para evaluar la calidad del hormigón armado elaborado a diferentes relaciones agua/cemento, antes de someterlo a condiciones reales de exposición en Cuba. Este resultado puede ser confirmado con la observación de muestras de hormigón a partir de la técnica de microscopía electrónica de barrido.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se elaboraron ocho probetas de hormigón simple en forma de paralelepípedos (200 x 200 x 200 mm) y 12 en forma cilíndrica (300 mm x 150 mm) de relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 respectivamente. Las relaciones 0,5 y 0,6 se corresponden con las más usadas en la elaboración del hormigón armado en Cuba. La combinación entre los agregados y el cemento fueron: cemento 365 kg, arena lavada de cantera 750 kg y gravilla 1 030 kg de un tamaño máximo nominal de 19 mm. El volumen de agua y el porcentaje de aditivo superplastificante usado dependió de la relación agua/cemento (Tabla. 1). El método para la determinación del asentamiento fue el cono de Abrams. De acuerdo con sus valores se está en presencia de una mezcla de consistencia fluida para las tres relaciones agua/cemento. Todas las probetas de hormigón fueron sometidas posteriormente al proceso de curado a inmersión completa en agua por un tiempo de 28 días a temperatura ambiente (NC ISO-1920-3: 2010).

Tabla.1. Volumen de agua y porcentaje de aditivo usado en la elaboración de las probetas.

Relación agua/cemento	Asentamiento (cm)	Volumen del agua real utilizado (L)	% de aditivo usado
0,4	15	148	1,7
0,5	17	186	1,2
0,6	18	222	1,0

2.1- Determinación de la resistencia a la compresión

Para la determinación de la resistencia a la compresión (MPa) se tomaron las 12 probetas cilíndricas para cada relación agua/cemento (NC-724:2009). Los 12 valores fueron obtenidos en una máquina de ensayo de fabricación rusa de fuerza máxima de compresión axial de 2 000 kn (Figura. 1).

Figura.1. Máquina de ensayo utilizada en la determinación de la resistencia a la compresión.

2.2. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico

Se obtuvieron 12 valores de velocidad de pulso ultrasónico entre dos probetas en forma de paralelepípedos para las tres relaciones agua/cemento a partir del método directo por cada cara. Para esto se utilizó un equipo de marca TICO PROCEQ TESTING INSTRUMENT de fabricación estadounidense de un rango de medición de 15 μ s a 6 550 μ s (10^{-6} s) con un ancho de banda de 54 Hz característicos para muestras pequeñas y medianas de hormigón (Figura.2).

Figura.2. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico en las probetas de hormigón.

Existen criterios en cuanto a la calidad del hormigón en dependencia de los valores obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico establecidos también en la RED DURAR de CyTED (Tabla.2).

Tabla.2. Criterios de calidad en dependencia de la velocidad de pulso ultrasónico.

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Calidad del hormigón
< 2 000	Deficiente
2 001 a 3 000	Normal
3 001 a 4 000	Alta
> 4 000	Durable

2.3. Determinación del porcentaje de porosidad capilar

El porcentaje de porosidad capilar se determinó inicialmente de acuerdo con el ensayo establecido por Göran Fagerlund a partir del flujo de absorción capilar del agua en probetas de hormigones y morteros (Trocónis, et al, 1997). Se realizaron 12 ensayos para cada relación agua/cemento en muestras cilíndricas de hormigón de 62 mm de diámetro y 20 mm de espesor. La toma de testigos cilíndricos se realizó haciendo uso de una máquina de extracción de marca WE de fabricación china en otras tres probetas de hormigón simple en forma de paralelepípedos correspondiente a las tres relaciones agua/cemento. Los testigos fueron cortados en una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT de fabricación estadounidense. Las zonas laterales curvas de las muestras cilíndricas fueron recubiertas con parafina para que el flujo de absorción capilar ocurra solamente por el área circular expuesta directamente al agua. Las muestras se colocaron sobre una esponja con agua en el interior de una cubeta plástica tapada, teniendo cuidado que el nivel no sobrepase una altura de 5 mm por encima de la superficie inferior de cada muestra debido a su peso. El área circular de absorción capilar que permaneció en contacto directo con el agua fue de 0,0032 m².

2.3.1. Determinación del porcentaje de porosidad capilar al vacío

El ensayo para la determinación del porcentaje de porosidad capilar al vacío se ejecutó también en 12 muestras cilíndricas de iguales dimensiones obtenidas de las tres restantes probetas en forma de paralelepípedo para cada relación agua/cemento. Este consistió en colocar las muestras de hormigón sumergidas totalmente en agua en una cámara de vacío. La cámara fue una desecadora acoplada a una trampa y bomba de vacío con un manómetro en la parte superior de la tapa (Figura.3).

Figura.3. Sistema utilizado en la determinación del porcentaje de porosidad capilar al vacío.

Las muestras permanecieron a una presión de vacío de -23 KPa a inmersión completa en el agua por un tiempo de 24 horas. Se utilizó una bomba de vacío marca GAST, modelo DOA-P 101-AA, 115V, 42A, 60 Hz, de fabricación estadounidense. Este tipo de ensayo no está referido en una norma de forma independiente. Más bien, forma parte del ensayo de la permeabilidad al ión cloruro el cual requiere de las condiciones de vacío para su ejecución (ASTM C-1202: 2012).

Después de extraídas las muestras de la cámara, se determinaba el peso saturado (W_{sat}), el peso sumergido en agua (W_{sum}) y el peso seco (W_{seco}). Estos pesos se determinaron en la misma balanza hidrostática utilizada en el ensayo anterior de marca METLER y de fabricación sueca de peso máximo 8 100 g y precisión de un gramo.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en el horno a una temperatura de 105°C hasta peso constante para obtener el peso seco. Los valores del porcentaje de porosidad capilar al vacío (P_{cv}) se determinaron de acuerdo con la expresión:

$$P_{cv} = \frac{W_{sat} - W_{sec}}{W_{sat} - W_{sum}} \quad (1)$$

Los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por ambos métodos fueron clasificados de acuerdo con los intervalos establecidos en la RED DURAR de CyTED (Tabla.3).

Tabla.3. 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

2.4. Ensayos de microscopía electrónica de barrido

Los ensayos de microscopía electrónica de barrido se ejecutaron en una muestra de la pasta endurecida de hormigón de pequeñas dimensiones para cada relación agua/cemento, con el propósito de introducirlas en la cámara del microscopio. Las muestras fueron secadas previamente y recubiertas en un equipo iónico de electrones de oro SPI MODULE SPUTTER COATER de fabricación estadounidense. Se utilizó un microscopio electrónico ambiental de barrido PHILIPS XL 30 ESEM de fabricación holandesa.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de los ensayos físico-químicos

En la evaluación de la calidad del hormigón por resistencia mecánica se demuestra, como para un incremento en su relación agua/cemento, los valores de resistencia a la compresión (R_c) fueron menores (Figura.4).

De acuerdo con lo establecido en la RED DURAR del CyTED, los valores promedio del parámetro (R_{cp}) estuvieron por encima de 20 MPa para los tres hormigones de diferentes relaciones agua/cemento. Esto es indicativo de su buena calidad y adecuada durabilidad antes de someterlo a condiciones reales de exposición (Figura.4). Por otra parte, según lo reflejado en la norma cubana NC 250:2005, solamente el hormigón de relación agua/cemento 0,6 presentó una resistencia a la compresión promedio inferior a 30 MPa.

Figura.4. Valores de resistencia a la compresión (R_c MPa) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU m/s) en las 12 muestras para las tres relaciones agua/cemento.

Este resultado permite demostrar que la resistencia a la compresión pudiera ser un parámetro necesario para evaluar la calidad del hormigón, antes de someterlo a condiciones reales de exposición, en este caso la atmósfera como el medio agresivo más difundido.

La calidad del hormigón estudiado es confirmada teniendo en cuenta el análisis de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). A pesar de que dicho parámetro disminuyó con el incremento de la relación agua/cemento como mismo sucedió en el comportamiento de la resistencia a la compresión. Los valores promedio (VPU_p) demuestran, que el hormigón armado para las tres relaciones agua/cemento debe presentar una calidad adecuada es decir durable, para resistir las condiciones reales de exposición según los intervalos de clasificación exigidos también en la RED DURAR de CyTED (Tabla.2).

Este resultado pudiera representar la buena homogeneidad del hormigón; cualidad que define la regular distribución de sus componentes en toda la masa de manera tal que en ella haya uniformidad en cuanto a estructura, composición, propiedades físicoquímicas y mecánicas. Se observa como la resistencia a la compresión fue bastante homogénea para los tres hormigones de acuerdo con su comportamiento (Figura.4).

De ahí, a que varios investigadores hayan considerado que la velocidad de pulso ultrasónico es un parámetro muy fundamental para confirmar la calidad del hormigón como un indicativo de su compacidad y por tanto de su durabilidad, antes de someterlo a condiciones reales de exposición. La compacidad es inversamente proporcional a la porosidad. Mientras mayor sea la primera, se garantiza una mejor protección primaria del hormigón contra la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

3.2. Análisis del porcentaje de porosidad capilar en el hormigón

Se observa, como a medida que se incrementa la relación agua/cemento, existe una mayor inclinación de la región lineal creciente en las curvas de absorción capilar correspondiente con la ganancia de agua en las muestras de hormigón (Figura.5 a), b) y c)). Se confirma que el incremento de la relación agua/cemento, garantiza valores menores del tiempo requerido en alcanzar el estado máximo de saturación (t) es decir, el tiempo en que las gotas de agua aparecen en la cara superior de las muestras. Esto resulta en valores menores de resistencia a la penetración del flujo de agua (m) así como de valores mayores de los coeficientes de absorción capilar determinados a partir de la pendiente de la recta (Tabla.4).

Este tiempo máximo de saturación, es obtenido a través de la extrapolación del punto que se establece entre la zona lineal creciente y la recta, es decir, donde ya la ganancia de agua comienza a mantenerse constante en el tiempo en la curva de absorción capilar (Figura.5 a), b) y c)). A partir del comportamiento de la ganancia de agua en función del tiempo a través de las curvas de absorción capilar donde fueron obtenidos los valores de tiempo máximo de saturación y posteriormente la resistencia a la penetración del agua se tiene, que precisamente la penetración del agua en el hormigón para las tres relaciones agua/cemento ocurrió de forma homogénea. Esto se confirma según los valores bajos de los coeficientes de variación obtenidos de cada uno de los parámetros determinados (Tabla.4).

Este resultado indica la buena distribución de los poros capilares y su interconexión en toda la masa de hormigón. Como bien se conoce, los poros capilares son los de mayor tamaño en comparación con los poros de aire y de gel. Estos poros capilares, al encontrarse interconectados en toda la pasta de cemento en el hormigón, son los máximos responsables de la llegada de los agentes agresivos hacia la superficie de los aceros de refuerzo originando el fenómeno de la corrosión atmosférica.

Se demuestra que, el hormigón armado antes de someterlo a condiciones reales de exposición, además de poseer una buena homogeneidad y compacidad debido a la buena distribución de sus elementos, según los valores de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico para las tres relaciones agua/cemento; puede presentar también una buena distribución de los poros capilares interconectados en la pasta de cemento endurecida en toda su masa.

figura.5. Comportamiento de la ganancia de agua en función del área y tiempo de exposición de las muestras en contacto directo con el agua. a) a/c 0,4; b) a/c 0,5 y c) a/c 0,6.

De acuerdo con la determinación de los valores del coeficiente de absorción capilar a partir del cálculo de la pendiente de la recta en las curvas y teniendo en cuenta los valores de resistencia a la penetración del flujo de agua, es de notar un incremento del porcentaje de porosidad capilar determinado en función de la relación agua/cemento (Figura.6 a)).

Lo mismo sucedió para los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por el método de la cámara de vacío (Figura. 6 b)). Es de notar como los valores de porcentaje de porosidad capilar obtenidos por ambos métodos no presentaron una significativa variación. Esto permite seguir demostrando la buena distribución de los poros capilares en toda la masa del hormigón para las tres relaciones agua/cemento.

Por otra parte se observa, como para el hormigón elaborado con una relación agua/cemento 0,6 los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por ambos métodos fueron muy similares. No siendo así para los hormigones elaborados a partir de las relaciones agua/cemento 0,4 y 0,5 en los cuales los valores de porcentaje de porosidad capilar determinado por el método de la cámara de vacío resultaron mayores. Este resultado demuestra que el método de la cámara de vacío a una presión de - 23 kPa, permite evaluar la permeabilidad del hormigón a través de la determinación del porcentaje de porosidad capilar en hormigones mucho más compactos. En cambio, el método de la absorción capilar del flujo de agua depende del tiempo en alcanzar el estado máximo de saturación de agua en las probetas.

Tabla.4. Valores de tiempo máximo de saturación y resistencia a la penetración del agua.

Numero de muestras	Relación agua/cemento 0,4		Relación agua/cemento 0,5		Relación agua/cemento 0,6	
	t (s)	m (s/m ²)	t (s)	m (s/m ²)	t (s)	m (s/m ²)
1	639 075,47	1,59x10 ⁹	210 195,13	5,25x10 ⁸	131 074,05	3,27x10 ⁸
2	772 975,18	1,93x10 ⁹	211 536,39	5,28x10 ⁸	127 943,78	3,19x10 ⁸
3	732 452,48	1,83x10 ⁹	278 609,35	6,96x10 ⁸	153 730,93	3,84x10 ⁸
4	727 806,65	1,81x10 ⁹	252 833,68	6,38x10 ⁸	97 319,58	2,43x10 ⁸
5	906 348,02	2,26x10 ⁹	255 184,45	6,37x10 ⁸	126 595,47	3,16x10 ⁸
6	602 642,58	1,50x10 ⁹	218 428,42	5,46x10 ⁸	88 565,12	2,21x10 ⁸
7	772 976,37	1,93x10 ⁹	281 904,81	7,04x10 ⁸	97 555,36	2,43x10 ⁸
8	768 243,81	1,92x10 ⁹	336 750,82	8,41x10 ⁸	155 514,42	3,88x10 ⁸
9	577 816,16	1,44x10 ⁹	314 274,89	7,85x10 ⁸	131 941,21	3,29x10 ⁸
10	607 956,41	1,51x10 ⁹	326 585,24	8,16x10 ⁸	116 986,31	2,92x10 ⁸
11	586 111,59	1,46x10 ⁹	231 050,89	5,77x10 ⁸	156 274,55	3,90x10 ⁸
12	581956,49	1,45x10 ⁹	260 693,31	6,51x10 ⁸	110 026,36	2,75x10 ⁸
<i>P</i>	692570,88	1,72x10 ⁹	264837,28	6,62x10 ⁸	124460,59	3,10x10 ⁸
<i>D.S</i>	108059,16	2,70x10 ⁸	43989,56	1,09x10 ⁸	23282,51	5,81x10 ⁷
<i>C.V (%)</i>	17,1	15,69	16,6	16,4	31,32	30,7

Por otra parte, se confirma que la técnica de saturación al vacío facilita el llenado continuo de agua en los poros permitiendo obtener los valores mayores de porcentaje de porosidad capilar.

Al hacer uso de los intervalos de clasificación mostrados en la Red DURAR del CYTED (Tabla. 3) se aprecia como para el hormigón de relación agua/cemento 0,4 el promedio de porcentaje de porosidad capilar determinado por el método de la absorción de agua es inferior a un 10% indicando un hormigón de buena calidad y durabilidad (Figura.6 a)). Para el hormigón de relación agua/cemento 0,5 indica un hormigón de moderada calidad. En el caso del hormigón de relación agua/cemento 0,6 el mismo presenta una baja calidad indicativo de una durabilidad inadecuada. Sin embargo, los valores promedios determinados por el método de la cámara de vacío indican, que el hormigón armado cubano pudiera presentar una baja calidad (Figura. 6 b)). No obstante, se trata de un ensayo perturbativo es decir, que la penetración del agua no ocurre de forma espontanea como sucede en el ensayo de absorción capilar. De forma general, todo parece indicar que el hormigón armado cubano elaborado a partir del entorno de las relaciones agua/cemento entre 0,5 y 0,6 no presenta una buena calidad. Por lo que no se garantiza un incremento en la durabilidad y vida útil de proyecto de las estructuras, además de la ejecución de trabajos de reparación en cortos períodos de exposición.

Figura.6. Valores de porcentajes de porosidad capilar determinados por ambos métodos.

El resultado en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón antes de someterlo a condiciones reales de exposición en Cuba de acuerdo con la determinación de la permeabilidad a partir de los valores de porcentajes de porosidad capilar obtenidos por ambos métodos difiere totalmente del obtenido de los ensayos de resistencia a la compresión y ultrasonido. Los valores obtenidos, principalmente de velocidad de pulso ultrasónico, demostraron que el hormigón armado cubano es durable, para las relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6.

Al tener en cuenta el incremento del coeficiente de absorción capilar y el porcentaje de porosidad capilar determinados por el método de la absorción capilar del agua, es de notar como el comportamiento entre ambos parámetros se ajustó al modelo estadístico basado en una función exponencial creciente $y = ae^{x/t}$. De esta manera, es posible obtener el porcentaje de porosidad capilar crítico a partir del cual comienza a incrementarse notablemente el coeficiente de absorción capilar en función del incremento de la relación agua/cemento, como un parámetro necesario para el establecimiento de su calidad, antes de someterlo a condiciones reales de exposición (Figura.7).

Figura.7. Comportamiento entre la absorción capilar del agua y el porcentaje de porosidad capilar en función del incremento de la relación agua/cemento.

De acuerdo con este análisis y teniendo en cuenta el parámetro estadístico t de la función se nota, que el flujo capilar de agua comienza a incrementarse de manera considerable a partir de un valor de porcentaje de porosidad capilar de 8% es decir, el valor promedio obtenido de este parámetro para el hormigón de relación agua/cemento 0,4; el cual presentó además una mejor calidad de acuerdo con los resultados de los dos primeros ensayos físico-químicos según los valores de los parámetros obtenidos (Figura.7).

Es de observar como el valor crítico obtenido resultó algo inferior al valor mínimo del parámetro establecido en la RED DURAR de CyTED (10%) con el fin de garantizar una elevada calidad en el hormigón. Por otro lado, se aprecia, como para la relación agua/cemento 0,4 hubieron al menos tres valores con un porcentaje de porosidad capilar superior al 8% (Figura.7). Se demuestra, que el hormigón armado cubano debe ser elaborado con una relación agua/cemento inferior o quizás igual a 0,4 para garantizar una mejor resistencia a la penetración de los agentes agresivos. Esto pudiera traer como resultado un mayor tiempo en iniciarse y propagarse el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Se debe tener en cuenta como elementos fundamentales a pie de obra, la garantía de una buena colocación, compactación, vibración, proyección y curado del hormigón.

3.3. Observación por microscopía electrónica de barrido

A partir de las observaciones en ambas muestras de pasta de hormigón, es de notar primero que todo la confirmación de que un aumento en la relación agua/cemento incrementa el número de poros capilares y por tanto la permeabilidad en el hormigón (Figura.8 a), b) y c)). Se aprecia como para el hormigón de relación agua/cemento 0,4 no hubo prácticamente una buena formación de poros capilares. Sin embargo, para los hormigones de relaciones agua/cemento 0,5 y 0.6; es de observar la existencia de poros capilares alrededor de 175 μm y más de 250 μm respectivamente.

Por lo que se confirma que, el hormigón armado elaborado a partir de estas últimas relaciones agua/cemento, no debe presentar la calidad requerida para garantizar elevados tiempos de durabilidad y vida útil principalmente bajo condiciones de agresividades corrosivas de elevada y muy elevadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Cuba. Este resultado en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón se corresponde con el demostrado de acuerdo con los valores de porcentaje de porosidad capilar. Por tanto, a la hora de evaluar la calidad del hormigón antes de someterlo a condiciones reales de exposición, se hace muy necesario además de los ensayos de resistencia a la

compresión y ultrasonido; la obtención y análisis de los valores del porcentaje de porosidad capilar haciendo uso de los métodos utilizados en este estudio.

Otro aspecto muy importante que se demuestra de acuerdo con la observación de las muestras es que efectivamente, la porosidad capilar en el hormigón se encuentra distribuida de manera uniforme en la pasta de cemento en la masa del hormigón; principalmente para los hormigones de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6.

Figura.8. Observaciones de las muestras de diferentes relaciones agua/cemento a partir de la técnica de microscopía electrónica de barrido; a) a/c 0,4; b) a/c 0,5; b) a/c 0,6.

4. CONCLUSIONES

1. Los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por ambos métodos demostraron que los poros capilares se encuentran interconectados y distribuidos también de forma homogénea en la pasta de cemento endurecida, para las tres relaciones agua/cemento.
2. Se obtuvo el modelo estadístico que permitió demostrar el porcentaje de porosidad capilar crítico al cual comienza a incrementarse el flujo capilar de agua en el hormigón en función de la relación agua/cemento, como un indicador más eficaz en la evaluación de la calidad y durabilidad del hormigón a partir de su permeabilidad.
3. Se demostró que los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico no son suficientes para la evaluación de la calidad del hormigón armado antes de someterlo a condiciones reales de exposición en zonas costeras bajo condiciones de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera en Cuba.

5. REFERENCIAS

- Acebes, M, et al. (2011), *Study of the influence of microstructural parameters on the ultrasonic velocity in steel-fiber-reinforced cementitious materials*. Construction and Building Materials. 25, pp. 3066-3072.
- Asociación Española de Normalización UNE (2001), *UNE-EN 12390-8:2001: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*.
- ASTM International. (2019). *C1202-19 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-19>
- Benmeddour, F, et al. (2012), *Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair*. Construction and Building Materials. 37, pp. 934-942.
- Bermúdez, M, A., Gutiérrez, P, A. (2007), *Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido*. Ingeniería de Construcción. Vol. 22 No. 1, pp. 15-22. Abril de 2007.

- Carvajal, A. M., Vera, R., Corvo, F., and Castañeda, A. (2011), *Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas*. Corrosion Engineering, Science and Technology. Vol. 47. No.1. UK.
- Castañeda, A., Rivero, C., Corvo, F. (2012), *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. Volumen 11, No. 33, pp. 49-60, pp. 49-61. Diciembre 2012.
- Castro-Borges, et al. (2012), *Análisis de daños por la interacción de cargas ambientales y estructurales en una subestructura marina*. Revista de la Construcción. Volumen 11, No.3. pp. 88-98. Diciembre 2012.
- Das, B. B., Kondraivendhan, B. (2012), *Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete*. Construction and Building Materials. 28, pp. 382-386.
- Fagerlund, G. (1986), *On the capillarity of Concrete*. Nordic Concrete Research, No. 11, Oslo, No. 6.
- Fernández, A., Molinero, P., Quintero, M., Henríquez, C. (2005), *Diagnóstico por corrosión de los balcones de edificio de 24 niveles ubicado en el litoral habanero*. Memorias Evento: CONPAT 2005. Asunción Paraguay, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción.
- Fernández, A., Martín, A. R., Rey, G., Pares, R., García, L., Lago, A., Denis, E. (2005), *Diagnostico de corrosión en obras de hormigón armado con más de 70 años de edad*. Memorias. Evento: CONPAT 2005. Asunción Paraguay, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción.
- Lian, C., Zhuge, Y., Beecham. S. (2011), *The relationship between porosity and strength for porous concrete*. Construction and Building Materials. 25, pp. 4294–4298.
- Norma Cubana (2005), *NC 250:2005: Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural*.
- Norma Cubana (2010), *NC ISO-1920-3 2010: Ensayos de hormigón. Parte 3: Elaboración y curado de probetas para ensayos*.
- Norma Cubana (2009), *NC-724:2009: Ensayos al hormigón. Resistencia del hormigón endurecido*.
- Trocónis, O. (2012), *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.
- Chunxiang Qian, B. H., Yujiang Wang, M. W. (2012) *Water seepage flow in concrete*. Construction and Building Materials, V. 35, pp. 491-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.043>