**Taller Internacional de Construcciones**

# Durabilidad de hormigones con cemento de bajo carbono LC3expuestos a la agresividad marina

***Durability of concretes with low carbon cement LC3 exposed to the marine aggressiveness***

Raúl González López 1, Dayrán Rocha F.2 Yosvany Diaz C.3, Fernando Martirena H.4

1-Raúl González López. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, [E-mail.raulglez@uclv.edu.cu](mailto:E-mail.raulglez@uclv.edu.cu)

2- Dayrán Rocha Francisco. Representante Comercial. Sucursal Pinturas MACY s.a [E- mail dayranrocha@nauta.com.cu](mailto:E-%20mail%20dayranrocha@nauta.com.cu)

3-Yosvany Diaz Cárdenas. Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM), Cuba.: [E- mail yosvanyd@uclv.edu.cu](mailto:E-%20mail%20yosvanyd@uclv.edu.cu)

4 Fernando Martirena Hernández. Director Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM), Cuba.: [E-mail martirena@uclv.edu.cu](mailto:E-mail%20martirena@uclv.edu.cu)

**Resumen:**

La presente investigación evalúa la incidencia de la agresividad marina en las propiedades del hormigón, observando una serie de requerimientos planteados en la NC 120:2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”, una vez delimitando para ello 3 sitios de exposición en la Provincia Villa Clara, Cuba.

Se realiza un análisis de los principales parámetros físico mecánicos que contribuyan a estimar la durabilidad del hormigón, empleando diferentes especímenes de hormigón y expuestos a niveles de agresividad marina variable durante 6,18 y 24 meses. Se emplea el cemento de bajo carbono LC3 fabricado en Villa Clara, como una alternativa viable para la producción de cemento, la mitigación del impacto ambiental y una mejora de la durabilidad del hormigón

Se fabrican seis mezclas del hormigón, atendiendo a las propiedades propugnadas en la norma para cada nivel de agresividad, contenido de cemento y relación agua/cemento, La durabilidad del hormigón armado expuesto a una agresividad ambiental elevada, resulta de notable importancia para su estudio en Cuba y a nivel global, dada las múltiples estructuras de hormigón que se construyen en zonas inmediatas al mar.

Una vez realizado los ensayos: absorción capilar, permeabilidad al aire, carbonatación, difusión de iones cloruros, resistividad eléctrica, entre otros, se procede finalmente a la que permiten evaluar la contribución efectiva del cemento LC3 a la durabilidad del hormigón, en ambientes de elevada agresividad del centro-norte de Cuba, en comparación con el aporte del cemento Pórtland ordinario P35.

***Abstract:***

*The present investigation evaluates the incidence of the marine aggressiveness in the properties of the concrete, observing a series of requirements outlined in NC 120:2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”, once defining 3 exhibition places for it in the Villa Clara Province, Cuba.*

*It is carried out an analysis of the main parameters physique and mechanics that contribute to estimate the durability of the concrete, using different concrete specimens and exposed at different levels of aggressiveness marine during 6, 18 and 24 months. The low carbon cement LC3 is manufactured in Villa Clara, like a viable alternative for the cement production, the mitigation of the environmental impacts and the improvement of concrete durability.*

*Six concrete mixtures are manufactured, assisting to the properties settled down in the Cuban norm for each aggressiveness level, cement content and relation water/cement, the durability of the reinforced concrete exposed to an environmental high aggressiveness, is of remarkable importance for its study in Cuba and at global, given level the multiple concrete structures that are built in immediate areas to the sea.*

*Once carried out the concrete tests: capillary absorption, air permeability, carbonation, ions chlorides migration, electric resistivity, among other, finally the effective contribution of the cement LC3 is evaluated to the concrete durability, in different atmospheres of high aggressiveness of the center-north of Cuba, in comparison with the contribution of the Ordinary Pórtland Cement P35.*

**Palabras Clave:** Durabilidad del hormigón, LC3; Cloruros; Resistividad eléctrica; Carbonatación; Permeabilidad.

***Keywords:*** *Concrete durability; LC3; Chlorides; Electrical resistivity; Carbonation; Air permeability.*

**1. Introducción**

El deterioro progresivo y acelerado de las estructuras producto de los efectos químicos y físicos del agua de mar en ambientes marinos tropicales, suscita serios problemas del hormigón armado en la construcción, de ahí la inaplazable comprensión ingenieril de este fenómeno en el hormigón.

[Cuba](zim://A/Cuba.html) con 5 746 km de [costa](zim://A/Costa.html)s recibe el impacto del aerosol marino en múltiples estructuras asentadas próximas al litoral, apreciándose perceptibles niveles del deterioro del hormigón armado en estas, debido a la influencia de cloruros, sulfatos y otros iones, junto a la presencia del oxígeno y dióxido de carbono en la matriz cementicia del hormigón.

La penetración de agentes agresivos al interior del material por diferentes mecanismos, dependiendo de la fuerza que acciona y su vulnerabilidad al intemperismo, afectan tanto al hormigón como al acero de refuerzo, de ahí que investigadores como: (Andrade, 2003; Zych, 2014; Abbas,2015; González, 2017), reconocen como principal causa del deterioro del hormigón la corrosión del acero de refuerzo, siendo la presencia de iones cloruros tanto en la fase acuosa como en la fase sólida hidratada del hormigón un elemento catalizador del proceso; donde el estado de humedad del hormigón y el entorno de servicio determinan la fuerza y los mecanismos de penetración de los cloruros en el hormigón. (Bioubakhsh, 2011)

El hormigón hidráulico emplea cantidades apreciables de cemento Pórtland, responsable este último del 7 por ciento de las emisiones a nivel mundial de CO2 y del 5 % del consumo de energía en el sector industrial (Martirena, 2011). La comprensión del comportamiento mecánico y durable de estructuras hormigón, conforme a las exigencias de calidad (tipo y contenido mínimo de cemento, relación agua-cemento máxima y mínima resistencia mecánica) según normativas internacionales, hizo posible el estudio de la durabilidad del hormigón en Cayo Santa María, Caibarién, a tono con las exigencias de la Norma Cubana 120: 2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”, mediante el empleo de especímenes de hormigón sometidos a niveles de agresividad marina variables.

Estudios del empleo del sistema ternario de clínquer - arcillas calcinadas - caliza, en porcentajes de 50; 30; 20 respectivamente, denominado (LC3), para morteros y hormigones reafirman su comportamiento mecánico y de la penetración de cloruros de Vizcaíno,(2014), K. Scrivener et al.(2019), ahí que el presente trabajo evalúa la durabilidad del hormigón, fabricado con cemento de bajo carbono denominado LC3, obtenido de la adición de la fracción arcillosa activada mediante calcinación, constituida por la mezcla de varias fases arcillosas([Alujas, 2010](#_ENREF_7)), sin claro predominio de ninguna de ellas.

Para ello se ha desarrollado un programa científico que contempla como objetivo general la evaluación del comportamiento del cemento de bajo carbono (LC3) y del cemento Pórtland P35, mediante la aplicación de los protocolos establecidos de ensayos físico-químicos esenciales para evaluar la durabilidad del hormigón, en correspondencia con la normativa cubana, al emplazar los bloques de hormigón en sitios de exposición de Cayo Santa María bajo regímenes variables de la agresividad marina.

**2. Programa experimental**

Se presenta el estudio de la durabilidad del hormigón fabricado en la planta de prefabricado de la ECOT Cayo Santa Maria, Villa Clara, con el cemento de bajo carbono LC3. Las dosificaciones de los hormigones objeto de estudio del trabajo según recomendaciones de Sánchez (2016), tienen en cuenta las especificaciones de la NC 120:2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”.

Figura 1. Bloques de hormigón en sitio de exposición Punta Matamoros, Cayo Santa María.Fuente: foto del autor

Los bloques de hormigón de la serie H1 permanecen durante 24 meses en zonas por encima del nivel de la marea alta y en zonas de recorridos de mareas y salpicaduras del sitio de exposición de Punta Matamoros, Cayo Santa Maria, que corresponde al nivel de agresividad marina muy alto. Un segundo sitio en la Sede Universitaria de Cayo Santa María, situado en la franja costera a más de 500 m y hasta 3 Km. del mar en la costa norte responde a una agresividad alta, donde se emplazan hormigones (serie H2), producidos con cemento LC3 y cemento Pórtland. Además, en el área de experimentación de la Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas”, distante a más de 20 km. de la costa norte en la ciudad de Santa Clara, se estacionan especímenes (serie H4) elaborados con cementos LC3 y cemento Pórtland P35, donde impera una agresividad ambiental baja.

Transcurridos los tiempos establecidos se procede a la extracción de testigos y conservación, hasta la realización de diferentes ensayos de caracterización para el estudio de la durabilidad del hormigón.

**2.1 Diseño y fabricación de las diferentes mezclas de hormigón**

El presente trabajo define seis tipos de mezclas, atendiendo a los parámetros recomendados por la norma cubana NC 120:2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”. Tres tipos de mezclas se realizaron con cemento Pórtland P35 (H1-CP, H2-CP y H4-CP), para una resistencia a compresión del hormigón de 20.0, 30.0 y 35.0 MPa empleando contenidos de cemento, relación a/c y aditivos Dynamon SX32 diferentes. Otras tres mezclas (H1-LC3, H2-LC3 y H4-LC3) emplean el cemento LC3, con resistencias a compresión y parámetros análogos a las mezclas anteriores.

Los áridos gruesos de la trituración de rocas calizas, de fracción gruesa (38 -19), media (19 -10) y agregado fino (4 -0) mm de la cantera El Purio, de Encrucijada Villa Clara. La Tabla 1. muestra dosificaciones de seis tipos de hormigones, fabricados en la ECOT Cayo Santa Maria.

Tabla 1. Dosificaciones gravimétricas de las 6 mezclas de hormigón. Elaboración propia

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezclas | Tipo  cemento | Resistencia compresión | Cont.de cemento | Relación agua/cem. | Agua | Aditivo  SX-32 | Áridos (kg) | | |
| f'c MPa | kg/m3 | kg | kg | Fino | Medio | Grueso |
| H1-CP | P35 | 35,0 | 430 | 0.4 | 172 | 3.8 | 634 | 352 | 775 |
| H2-CP | P35 | 30,0 | 405 | 0.45 | 182 | 3.6 | 651 | 362 | 796 |
| H4-CP | P35 | 20,0 | 345 | 0.55 | 190 | 3.1 | 690 | 384 | 844 |
| H1-LC3 | LC3 | 35,0 | 430 | 0.4 | 172 | 8.6 | 634 | 352 | 775 |
| H2-LC3 | LC3 | 30,0 | 405 | 0.45 | 182 | 8.1 | 651 | 362 | 796 |
| H4-LC3 | LC3 | 20,0 | 345 | 0.55 | 190 | 6.9 | 690 | 384 | 844 |

(Fuente: [Sánchez, 2016](#_ENREF_49)).

Se evalúa el hormigón de las series H1, H2 y H4 fabricadas con cemento de bajo carbono LC3 y de cemento Pórtland ordinario P35, según [Sánchez (2016](#_ENREF_49)) y Rocha (2017), una vez estacionados previamente en los sitios de exposición y laboratorios, durante 6, 18 y 24 meses, expuestos a condiciones ambientales variables según la distancia al mar. Se evalúa la resistencia a compresión, permeabilidad al aire, por el método de Torrent ([Torrent, 2012](#_ENREF_53)); la resistividad eléctrica, migración de iones cloruro según la ASTM C 1202; la profundidad de carbonatación y finalmente los estudios de absorción capilar, tal como se detalla a continuación.

**2.2** **Ensayos de especímenes de hormigón estacionados en sitios de exposición**

Los bloques cilíndricos de hormigón colocados en sitios de exposición y laboratorios, durante el tiempo establecido facilitan la extracción y preparación final de especímenes según los ensayos que se detallan a continuación.

**2.2.1 Resistencia a compresión del hormigón de las mezclas fabricadas**

La resistencia a compresión de especímenes en las series de hormigón fabricadas permite estimar el aporte del cemento LC3, con sustituciones de hasta el 50% del clínquer del cemento Pórtland por arcillas calcinadas y calizas, con respecto al hormigón de cemento Pórtland P35 de la fábrica Karl Marx, Cienfuegos. Tabla 2. Resistencia a compresión de las mezclas hormigón.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezclas | Tipo  cemento | Tipo de exposición NC 120:2014 | Resist. a compresión f'c MPa  MPa | Cont. cemento  kg/m3 | Relación agua/cem. | Resistencia a compresión f'cm MPa | | |
| 3 d | 7 d | 28 d |
| H1-CP | P35 | < 500 m | 35.0 | 430 | 0.4 | 23.3 | 30.0 | 34.0 |
| H2-CP | P35 | 500 <d< 2km | 30.0 | 405 | 0.45 | 17.3 | 23.0 | 28.0 |
| H4-CP | P35 | > 20 km | 20.0 | 345 | 0.55 | 12.0 | 14.7 | 19.6 |
| H1-LC3 | LC3 | < 500 m | 35.0 | 430 | 0.4 | 14.0 | 20.6 | 36.3 |
| H2-LC3 | LC3 | 500 <d< 2km | 30.0 | 405 | 0.45 | 10.3 | 16.3 | 27.0 |
| H4-LC3 | LC3 | > 20 km | 20.0 | 345 | 0.55 | 7.0 | 12.0 | 18.6 |

(Fuente: elaboración propia).

* + 1. **Resistencia a la penetración del ion cloruro en especímenes de hormigón**

De las formas de ingreso de cloruros al hormigón, la difusión constituye un mecanismo dominante a largo plazo en estructuras sometidas a ambientes marinos. Mediante el equipo PROOVE’it- PR-1050, de ocho celdas, se obtiene la resistencia del hormigón al ingreso de iones cloruros según PROOVE’it. (2010), mediante la prueba rápida presente en la norma ASTM 1202 “*(Rapid Chloride Permeability Test, RCPT)*”.

Tabla 3. Carga eléctrica total en especímenes de mezclas de hormigón

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezclas | Tipo  cemento | Resistencia compresión  MPa | Cont. de cemento kg/m3 | Carga eléctrica total (coulombs) | | |
| 6 meses | 18 meses | 24 meses |
| H1-CP | P35 | 35,0 | 430 | 3012 | 3158 | 3448 |
| H2-CP | P35 | 30,0 | 405 | 1745 | 2844 | 3015 |
| H4-CP | P35 | 20,0 | 345 | 4601 | 4291 | 3860 |
| H1-LC3 | LC3 | 35,0 | 430 | 268 | 240 | 216 |
| H2-LC3 | LC3 | 30,0 | 405 | 281 | 189 | 142 |
| H4-LC3 | LC3 | 20,0 | 345 | 315 | 198 | 146 |

(Fuente: elaboración propia).

En la tabla 3 se muestra el comportamiento del hormigón a edades de 6, 18 y 24 meses al paso de iones cloruro. Aunque, no mide la "permeabilidad" a cloruros, la carga pasada o conductancia eléctrica, puede básicamente relacionarse al coeficiente de difusión.

En hormigones fabricados con cemento de bajo carbono LC3 se logra significativos aumentos de la resistencia a la penetración del ion cloruro, con relación al hormigón de CPO para las diferentes mezclas y periodos de tiempo. Especímenes de las series H1-LC3, H2-LC3 y H3-LC3, atendiendo a la tabla X1.1 de la norma ASTM C1202-19, tienen una penetrabilidad al ion cloruro muy baja, según la carga pasada (coulombs), mientras que en muestras con cemento P35 resulta moderada. El hormigón fabricado con LC3 un comportamiento superior, en comparación con hormigones de CPO.

* + 1. **Profundidad de la carbonatación del hormigón de las mezclas**

La carbonatación y la penetración de iones cloruros constituyen mecanismos de deterioro de estructuras de hormigón armado limitando la vida útil de las estructuras. La Tabla 4, detalla la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004 del hormigón, atendiendo al sitio y niveles de exposición.

Tabla 4. Profundidad de carbonatación y permeabilidad al aire del hormigón

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezclas | Prof. de carbonatación (mm) | | | Permeabilidad media kT (10-16 m2) | | |
| 6 meses | 18 meses | 24 meses | 6 meses | 1.5 años | 2 años |
| H1-CP | 0 | 0 | 0 | 1,6 | 0.18 | 0.072 |
| H2-CP | 0.4 | 1.75 | 3.6 | 1.7 | 1.4 | 0.61 |
| H4-CP | 3 | 3 | 5 | 0.56 | 0.43 | 0.01 |
| H1-LC3 | 4 | 3 | 5 | 0,09 | 0.17 | 0.058 |
| H2-LC3 | 5 | 7.25 | 9.5 | 0.15 | 0.46 | 0.17 |
| H4-LC3 | 8.8 | 13 | 13 | 0,34 | 0.23 | 0.38 |

(Fuente: elaboración propia).

En especímenes de hormigón de cemento de bajo carbono LC3 se alcanza mayor profundidad de carbonatación promedio, al comparar con hormigones de cemento P35. Estos hormigones de cemento LC3 manifiestan un marcado incremento de la carbonatación, de la serie H1 a la H4, al decrecer el contenido de cemento y aumentar la relación agua/ cemento.

* + 1. **Permeabilidad al aire del hormigón de las mezclas producidas**

Al caracterizar la permeabilidad del hormigón, no existe un método perfecto, a pesar de la existencia de múltiples métodos de evaluación. No obstante, según el (CEB-FIP MODEL CODE, 1990) y Torrent, R. (2015a) la permeabilidad del hormigón al aire, se relaciona con la resistencia al ingreso de medios agresivos, como medida potencial de la durabilidad del hormigón.

Se muestran resultados de los ensayos permeabilidad al aire según Torrent, R. (2012) en la Tabla 4. de los especímenes situados en diferentes sitios y niveles de agresividad. A 24 meses los hormigones fabricados con el cemento LC3 tienen un valor de kT menor que los hormigones elaborados con cemento P35 excepto en la serie H4-CP.

* + 1. Resistividad eléctrica del hormigón de las mezclas

Estudios recientes de la resistividad eléctrica manifiestan su correlación con las mediciones velocidad de difusión del ion cloruro. Mediante el equipo de sondas interiores situadas a una distancia de 50 mm que garantizan un flujo homogéneo. Los resultados de resistividad eléctrica superficial y la porosidad efectiva de las mezclas se muestran en la tabla 5.

El hormigón H1-LC3 de mayor resistividad eléctrica que el elaborado con CPO, permite inferir que dicho hormigón presenta riesgo de corrosión insignificante al superar los 100 kΩcm.

Tabla 5: Resistividad eléctrica y porosidad efectiva de las mezclas de hormigón

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezclas | Valor Promedio (kΩ cm) | | | Densidad | Porosidad efectiva (%) | |
| 6 meses | 18 meses | 24 meses | (kg/m³) | 18 meses | 24 meses |
| H1-CP | 15.4 | 16.0 | 37.6 | 2407.69 | 7.8 | 12.84 |
| H2-CP | 16.4 | 15.1 | 36.3 | 2707.33 | 7.6 | 12.38 |
| H4-CP | 16.8 | 17.3 | 14.7 | 2368.22 | 10.4 | 7.82 |
| H1-LC3 | 123.2 | 178.6 | 670.5 | 2229.44 | 5.6 | 12.8 |
| H2-LC3 | 156.8 | 235.5 | 588.7 | 2233.68 | 5.5 | 15.1 |
| H4-LC3 | 176.3 | 269.3 | 211.6 | 2274.00 | 7.8 | 16.1 |

(Fuente: elaboración propia).

* + 1. **Ensayo de absorción del agua por capilaridad**

La tabla 5 muestra la porosidad efectiva de hormigones a edades de 18 y 24 meses, donde se aprecia que hormigones con empleo del cemento de bajo carbono LC3 logran una menor porosidad capilar que los hormigones fabricados con CPO, mientras los hormigones H4-CP al ser más permeables aumentan el riesgo a la entrada de agentes externos. En la tabla 5 a 24 meses, ambos hormigones producidos con los cementos LC3 y P35 muestran valores similares de porosidad efectiva para un régimen de agresividad alta.

**3. Resultados y discusión**

Al evaluar la resistencia a compresión del hormigón, el tipo H1-LC3, supera el valor proyectado de resistencia a compresión a 28 días (ver figura 9). A pesar de las mezclas H2.LC3 y H4-LC3, superar el 90 por ciento de la resistencia proyectada a 28 días, el carácter puzolánico del cemento de bajo carbono LC3 a edades avanzadas podría sobrepasar el valor inicial.

Según los métodos planteados por Zych,(2014), en el caso de la resistencia al ingreso del ion cloruro aumenta en el hormigón H1,H2 y H4 elaborado con cemento LC3, respecto al hormigón de cemento Pórtland, coincidiendo con la sustitución parcial del clínker del CPO por arcillas calcinadas-calizas finamente molidas.

Fig 9. Resistencia a compresión del hormigón con cemento LC3 (Fuente: elaboración propia).

Aunque la adición puzolánica influye en la resistencia en las primeras edades del hormigón como plantea Dopico (2009), se aprecia la dependencia de la relación agua-material cementante, volumen de pasta y del grado de hidratación del sistema en las mezclas, para la mejora las propiedades del material y de la estructura de poros. La permeabilidad al ion cloruro del hormigón varía en función del tipo y contenido de cemento en el hormigón de 430 a 345 kg/m3, y relación a/c efectiva de 0.40-0.55. Tal incremento de la resistencia a la penetración de iones cloruro concuerda con Vizcaíno (2014), Martirena, F. (2016), Bioubakhsh (2011), Carmona, (2015). donde el cemento LC3 contribuye al refinamiento de la estructura de poros y reforzamiento de la zona de transición.

Fig. 10 Profundidad de carbonatación de las mezclas de hormigon. (Fuente: elaboración propia).De los estudios de carbonatación del hormigón realizados por Andrade, C., Sanjuán, M. a., & & Cheyrezy, M. (2003), en el caso del hormigón H1, H2 y H4 con ambos tipos de cemento en el tiempo, se sucede un iincremento con el tiempo en los diferentes sitios de exposición. No obstante, una variacion mas pronunciada se produce en hormigones con LC3. A criterio de los autores, la saturación de los poros del hormigón hasta cerca del 80 % durante gran parte del año, repercute en las series H1 y H2 en Cayo Santa María, al dificultar la difusión del CO2, coincidiendo con [Licor,(2016](#_ENREF_30)) en tales hormigones. Los hormigones de cemento LC3 resultan más sensibles a la carbonatación, además de la reducción de la alcalinidad en el hormigón. Al determinar la permeabilidad al aire de hormigones según el método de Torrent.

Fig. 11 Permeabilidad al aire del hormigon (Fuente: elaboración propia).

Se observa como el hormigón con cemento LC3, logra un superior comportamiento (ver tabla 4), siendo evaluada de baja a media en el caso de las mezclas H1 y H2 con relación a mezclas análogas de cemento Pórtland (P-35). La figura 11 muestra una permeabilidad al aire media en hormigones H4, sometidos a un ambiente de limitada agresividad ambiental.

En concordancia con lo planteado por Vélez, (2010) en los hormigones fabricados con cemento de bajo carbono LC3, se alcanza una menor permeabilidad al aire, ante la presencia de agresividades alta y muy alta del entorno. De manera general, para todas las edades los hormigones con LC3 alcanzan valores del coeficiente kT más bajos, excepto en hormigones de serie H4 que experimentan una permeabilidad catalogada como media o normal para un nivel de agresividad bajo a 24 meses.

El análisis del comportamiento de la resistividad eléctrica corrobora que los hormigones con LC3 aumenta de forma significativa con el paso del tiempo para condiciones de agresividad alta y muy alta. En hormigones elaborados con CPO no se aprecia un aumento manifiesto de la resistividad eléctrica, como muestra la figura 12 para las edades de 6, 18 y 24 meses.

Del análisis de la resistividad eléctrica según Andrade (2009), se llega a corroborar el comportamiento de los hormigones con LC3 al aumentar de forma significativa con el paso del tiempo para condiciones de agresividad alta y muy alta. En hormigones elaborados con CPO no se aprecia un aumento manifiesto de la resistividad eléctrica, como muestra la figura 12 para las edades de 6, 18 y 24 meses. Además, en hormigones de cemento LC3 se incrementa de 14 a 17 veces la resistividad a la edad de 24 meses con relación al hormigón de cemento Pórtland.

Fig. 12 Resistividad eléctrica del hormigon (Fuente: elaboración propia).

De resultados obtenidos de la porosidad efectiva del hormigón según la NC-345: 2004, se aprecia cómo en esta propiedad influye de forma negativa la edad del hormigón expuesto (ver figura 13).

Fig.13 Absorción de agua de especímenes de hormigón (Fuente: elaboración propia).

Se infiere que la porosidad efectiva en especímenes de LC3, crece linealmente en las mezclas de H1 a H4, independientemente de la agresividad del medio, lo cual difiere del decrecimiento experimentado en el tiempo del hormigón de cemento P35, donde el menor valor de porosidad efectiva se logra en el hormigón H4-CP, para una agresividad ambiental baja.

**4. Conclusiones**

* Hormigones elaborados con el cemento de bajo carbono LC3 muestran un proceso de densificación de la estructura de poros que supera al elaborado con CPO, al apreciar resultados superiores de la permeabilidad al aire.
* En los hormigones elaborados con LC3 se aprecia el efecto marcado de la carbonatación, aun cuando los mismos logran un menor índice de permeabilidad y porosidad, asociado a la sustitución del clínker del cemento Pórtland y la reducción de la alcalinidad, donde la carbonatación en los hormigones producidos avanza de manera rápida en los primeros 24 meses.
* La influencia de la variable tiempo resulta decisiva en los hormigones elaborados con cemento LC3, pues a la edad de 24 meses se logran superiores resultados de la permeabilidad al aire, resistividad eléctrica y de la penetración al ion cloruro.
* La utilización de los sitios de exposición básicos utilizados en el estudio de la durabilidad de los hormigones a partir de la realización de los ensayos a mediano plazo, infiere la construcción y explotación de nuevas facilidades constructivas en un nuevo sitio de exposición de mayores potencialidades y seguridad.

**5. Referencias bibliográficas**

* + - 1. Abbas, Y. (2015). *In-situ measurement of chloride ion concentration in concrete.* (Doctoral Tesis), The Netherlands.
      2. Alonso, R. (2017). *Diseños de mezcla de hormigón para la construcción de puentes con Cemento de Bajo Carbono. Caso de Estudio: Puente Viaje Infinito. .* (Tesis de Grado), Universidad Central de las Villas.
      3. Alujas, A. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente.* (Tesis de Doctor en Ciencias), Universidad Central de las Villas.
      4. Andrade, C. (2009). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad. .
      5. Andrade, C., Sanjuán, M. a., & & Cheyrezy, M. (2003). Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research, 15*, 171-180.
      6. ASTM-C-1202.(2019). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Estados Unidos.
      7. Bioubakhsh, S. (2011). *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling.* (Doctoral thesis), UCL (University College London).
      8. Carmona, M. y. (2015). *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ion cloruro vs la relación agua cemento.* Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
      9. Dopico Montes de Oca, J. J., Martirena Hernandez, J. F., López Rodríguez, A., & González López, R. (2009). Efecto de la adición mineral cal-zeolita sobre la resistencia a la compresión y la durabilidad de un hormigón. *Revista ingeniería de construcción, 24*(2), 181-194.
      10. González, B. Y. (2017). *Evaluación de hormigones producidos con cemento de bajo carbono (LC3) desde la perspectiva de la NC 120:2014.* (Trabajo de Diploma), Universidad Central de las Villas.
      11. Scrivener, K., A. Dekeukelaere, F. Avet, L. Grimmeissen (2019). Financial Attractiveness of LC3. LC3-Project / École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne 2019
      12. Licor C., A. (2016). *Evaluación de la carbonatación en hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC3.* Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
      13. Martirena, J. F. (2011). Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de emento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa.
      14. Martirena, F. (2016). Anales de la Academia de Ciencias de Cuba. Vol.6 No.3 2016
      15. NC:120. (2014). Hormigon hidráulico - especificaciones, Cuba. Hormigón endurecido- determinación de la absorción de agua por capilaridad, Cuba.
      16. NC:345. (2011). Hormigon endurecido-determinacion de la absocion de agua por capilaridad.
      17. NC:355. (2004). Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio, Cuba. .
      18. Proceq. (2015). Manual de ensayos no destructivos de durabilidad en hormigones.
      19. PROOVE’it. (2010). Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros
      20. Sánchez, E. A. M. (2016). *Diseño y fabricación de hormigones hidráulicos con un cemento de bajo carbono LC3 con arcillas del yacimiento El Yigre.* (Trabajo de Diploma), Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
      21. Torrent, R. (2012). *Non-destructive air-permeability measurement: From gas-flow modelling to improved testing.* Paper presented at the The 2nd International Conference of Microdurability, 7 April 2012 Amsterdam, the Netherlands.
      22. Torrent, R. (2015a). Durabilidad: Definición y Aspectos Generales.
      23. Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto.
      24. Vizcaíno, L M. 2014, Cemento de Bajo Carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada – caliza, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
      25. Zych, t. (2014). *Test methods of concrete resistance to chloride ingress.* Institute of Building materials and structures, Cracow University of Technology.