

ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN SECUNDARIA QUE BRINDA EL ENCOFRADO DE PVC AL HORMIGÓN DEL SISTEMA ROYAL

**René A. Puig Martínez¹, Marietta Llanes Pérez², Alejandro Fernández Domínguez³,
Claudia Juliette Hubert Morales⁴**

¹ Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero Constructor. Profesor Titular. Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba, rpuig@civil.cujae.edu.cu

² Doctora en Ciencias Técnicas. Ingeniera Civil. Profesora Titular. Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba, marietta@civil.cujae.edu.cu

³ Master en Ingeniería Civil. Ingeniero Civil. Profesor Asistente. Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba, afernandezd@civil.cujae.edu.cu

⁴ Ingeniera Civil. Especialista B en contingente Blas Roca, La Habana, Cuba, hubert92@nauta.cu

RESUMEN

En la Zona Especial de Desarrollo del Mariel se construyen obras por el sistema constructivo Royal Building, de origen canadiense y que se emplea en Cuba desde principios de siglo. Este sistema constructivo se caracteriza por el empleo de un encofrado perdido de PVC, que una vez hormigonado, sirve de terminación superficial a los muros. En el Mariel, actualmente, los hormigones para este sistema se diseñan para condiciones de agresividad alta y muy alta, no tomando en cuenta la posible protección que brinda el encofrado perdido de PVC. Por otro lado, nunca en Cuba se ha cuantificado la posible protección secundaria a la acción de iones cloruros provenientes del aerosol marino, que brinda dicho encofrado al refuerzo estructural del sistema. En la investigación, haciendo uso del método de Vollhard, se determina la concentración de iones cloruros en muestras de hormigón a diferentes profundidades, demostrándose que dicho encofrado, inhibe la penetración de estos en el hormigón más allá de los rangos establecidos en la norma NC 120 del año 2018, posibilitando realizar diseños de mezclas para bajas condiciones de agresividad, con el consecuente ahorro de cemento.

Palabras claves: hormigón, iones cloruros, sistema Royal

STUDY OF THE SECONDARY PROTECTION PROVIDED BY THE PVC FORMWORK TO THE ROYAL SYSTEM

ABSTRACT

In the Mariel Special Development Zone, works is built by the Royal Building construction system, of Canadian origin and used in Cuba since the beginning of the century. This construction system is characterized by the use of a lost PVC formwork, which once concreted, serves as a surface finish for the walls. In Mariel, currently, the concretes for this system are designed for conditions of high and very high aggressiveness, not taking into account the possible protection provided by the lost PVC formwork. On the other hand, in Cuba the possible secondary protection to the action of chloride ions from the marine spray has never been quantified, which provides said formwork to the structural reinforcement of the system. In the investigation, using the Vollhard method, the concentration of chloride ions in concrete samples at different depths is determined, showing that said formwork inhibits the penetration of these into the concrete beyond the ranges established in the NC 120 standard of the year 2018, making it possible to make mix designs for low aggressive conditions, with the consequent saving of cement.

Keywords: concrete, chloride ions, Royal systems.

Nota Editorial: Recibido: abril 2020; Aceptado: septiembre 2020

1. INTRODUCCIÓN

El sistema Royal Building (Royal Building System), creado en 1974 por la compañía Royal Group Technologies [1,3], es un sistema constructivo de origen canadiense que fue introducido en el mercado en el año 1991, ofreciendo al cliente un kit de encofrados. Con el paso del tiempo se ha ido diseminando por todo el mundo y actualmente tiene plantas industriales en más de 40 países, entre ellos México, Colombia, Polonia y China [2]. Constituye un sistema relativamente nuevo comparado con otros métodos de construcción, siendo introducido en Cuba para la ejecución de viviendas en la primera década del actual siglo, demostrando en poco tiempo su utilidad para la construcción también de otras obras sociales y de servicio.

Por sus cualidades de prefabricación disminuye los tiempos de construcción. Las obras son armadas con muros de paneles y conectores de PVC, con ensambles machihembrados y rellenos de hormigón. En el continente americano, los paneles utilizados en la construcción son importados desde plantas en la casa matriz o desde Sudamérica [2].

Según los creadores, combina la durabilidad, protección y estética que brindan polímeros como el PVC con la resistencia que aporta el hormigón [1,3].

El empleo de variantes de protección secundaria en los hormigones, dirigido a evitar la penetración de agentes agresivos en el hormigón, es un procedimiento conocido y tratado por diferentes autores [9-16], siempre propio de regiones en las cuales la agresividad medio ambiental es elevada.

Si bien los creadores del sistema han comprobado que la superficie de los moldes garantiza la protección del hormigón armado contra los agentes del intemperismo [1,3], no se ha comprobado si en el entorno de unión machihembrada hay penetración de agentes agresivos, como los iones cloruros, en particular en las regiones de elevada agresividad costera cubanas, como ocurre en la Zona Especial de Desarrollo del Mariel, en las cuales los aerosoles marinos son extremadamente fuertes y que está empleando en diversas obras este sistema.

Al no haber comprobado el nivel de protección que brinda el encofrado perdido de PVC, la empresa de construcción y montaje del Mariel para la dosificación de las mezclas de hormigón obvia ello, diseñando este material para diferentes niveles de agresividad, entre ellas, para el nivel de agresividad alta o muy alta que caracteriza la Zona de Desarrollo del Mariel, con el consecuente incremento del consumo de cemento portland. Precisamente el objetivo general de la investigación a que hace referencia el artículo, es valorar la protección secundaria que brinda este encofrado perdido de PVC al hormigón armado del sistema, en particular al acero de refuerzo, contra la acción de iones cloruros provenientes del aerosol marino, dirigido a optimizar el consumo de cemento en los diseños de dosificaciones de mezclas de hormigón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Precisamente la ubicación en la Zona Especial de Desarrollo del Mariel de muchas de las obras que motivaron la investigación, se caracteriza por la agresividad muy alta o alta según la tabla 1 de la norma cubana NC 250 del año 2005 [17]. Además del Mariel, el sistema se ha empleado exitosamente en Cuba en las provincias de La Habana, Matanzas, Villa Clara, Cienfuegos, Holguín y Santiago de Cuba. En cada una de las obras construidas por las diferentes empresas, el diseño de las dosificaciones para las mezclas de hormigón se ha efectuado en correspondencia con los niveles de agresividad imperantes en cada lugar y con los materiales locales disponibles, sin considerar la posible protección secundaria que podría brindar el encofrado perdido de PVC.

El elemento característico del sistema es un conjunto de moldes de PVC, ensamblados de forma machihembrada, en el interior de los cuales se coloca el acero de refuerzo, rellenándose posteriormente de hormigón. La figura 1 muestra fotos de los moldes y sus conectores [1,3]. Es un sistema hormigonado de forma continua sin presencia de juntas constructivas entre los elementos, garantizando los moldes perdidos un excelente acabado exterior, incluso sin necesidad de pintura.

En la propia figura 1 pueden apreciarse las pestañas que garantizan la unión machihembrada entre moldes.

Si como afirman los creadores del sistema, el encofrado perdido garantiza protección contra los agentes del intemperismo, incluidos los iones cloruros, no existe razón para diseñar y utilizar mezclas propias de condiciones de alta o muy alta agresividad que consumen necesariamente mayor masa de cemento por metro cúbico de hormigón.

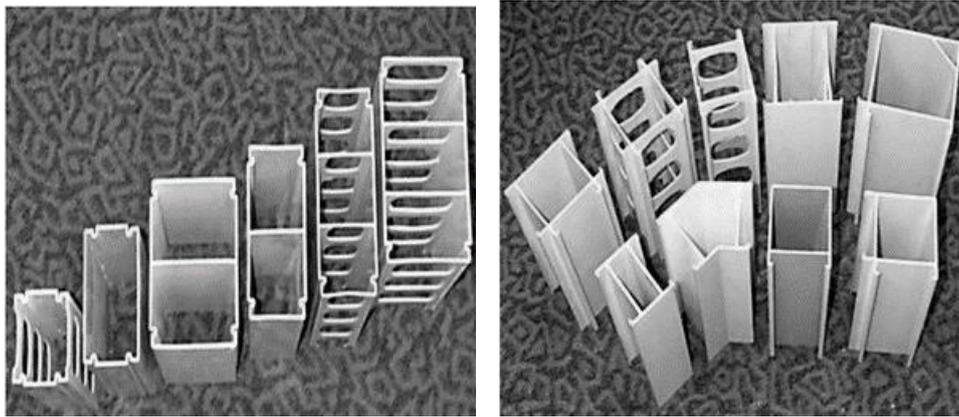


Figura 1: Paneles y conectores empleados en el sistema [3]

Las dosificaciones para las mezclas de hormigón destinadas al sistema objeto de estudio producidas por las plantas dosificadoras y mezcladoras del Mariel, utilizan a modo de áridos arena y granito, provenientes de la cantera La Molina, además de emplear polvo de piedra de la misma cantera con el objetivo de atenuar el elevado módulo de finura de la arena. Los áridos empleados cumplen las especificaciones establecidas por la norma cubana NC 251 [17], excepto en el módulo de finura de la arena, que en el momento de la investigación era de 3,59, ligeramente superior al máximo recogido en la norma.

El cemento empleado es P-35 producido en la fábrica del Mariel, que de acuerdo con los ensayos realizados cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC 95 [17]. Como aditivo, la empresa emplea en la actualidad el súper-fluidificante Dynamon SRC 20, certificado con un documento de idoneidad técnica emitido por el Centro de Investigación y Desarrollo de los Materiales, adscrito al Ministerio de la Construcción de Cuba.

De acuerdo con las especificaciones de los creadores del sistema y los proyectos técnicos elaborados por la empresa para las obras concretas a construir, la mezcla de hormigón debe garantizar una resistencia característica a 28 días de 30 MPa, un asentamiento en el cono de Abrams de 160 mm en el momento de vertido y un tamaño máximo del árido grueso entre 9,5 mm y 12,5 mm. La relación agua/cemento en correspondencia con el nivel de agresividad medio ambiental y la propia resistencia a compresión a 28 días.

Con estos elementos se efectuaron en el laboratorio del Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), de la Universidad Tecnológica de La Habana, los diseños de dosificaciones para los cuatro niveles de agresividad establecidos en la norma cubana NC 250 [17]. Los resultados de las dosificaciones pueden ser apreciados en la tabla 1.

Tabla 1: Dosificaciones de la mezcla de hormigón para las obras construidas por el sistema Royal Building en la Zona Especial de Desarrollo del Mariel

No	Nivel de agresividad	Peso de materiales para 1 m ³ de hormigón (kg)					
		Cemento P-35	Arena "La Molina"	Granito "La Molina"	Polvo de piedra	Aditivo SRC-20	Agua
1	Muy alta	488	703	576	352	3,7	191
2	Alta	434	704	576	388	3,3	193
3	Media	391	704	576	425	3,1	195
4	Baja	353	699	573	473	2,7	196

Fuente propia: Informe parcial No. 2 del contrato de prestación de servicios científico técnicos. Contrato No. 170/16 FC, código ONEI 83139

Estos diseños están incluidos en un paquete de dosificaciones para las diferentes obras que construye en la actualidad la empresa del Mariel [7]. En el diseño de las dosificaciones se siguió el procedimiento del ACI, teniendo en cuenta recomendaciones de otros autores [4-6,8].

Para evaluar el cumplimiento por los diseños de los requerimientos de resistencia y durabilidad, con cada uno de los cuatro diseños se prepararon dos amasadas, principal y réplica, y se confeccionaron ocho probetas normalizadas para ensayos, cuatro correspondientes a cada amasada. Se emplearon seis probetas para determinar la resistencia a compresión del hormigón a 28 días y la densidad en estado endurecido, tres para el ensayo principal y tres para su réplica. También a esas seis probetas se efectuaron ensayos de ultrasonido

y resistividad antes de proceder a su rotura. Y las otras dos probetas se destinaron al ensayo de porosidad efectiva.

El aerosol marino se origina a partir de la rotura de burbujas en la interfase entre la atmósfera y la superficie del mar. Este efecto es importante cuando el viento alcanza un determinado límite de velocidad que algunos autores consideran que está alrededor de 7 m/s, sin embargo, hay otros datos que indican que desde los 3 m/s el fenómeno de la niebla salina ya empieza a ser significativo, produciéndose un incremento en la concentración de sales de cloruro con el aumento de la velocidad del viento. En el caso de las estructuras de hormigón armado que se encuentran muy cerca de la costa, los iones cloruro penetran en presencia de humedad a una determinada profundidad, manteniendo el ambiente saturado y propiciando entonces la entrada por difusión, mientras que cerca de la superficie la atmósfera ejerce un proceso de humectación y secado dando lugar a fenómenos de absorción donde el hormigón pudiera deteriorarse aceleradamente [10,11,15,16].

Con el fin de verificar la penetración o no de los iones cloruro en el hormigón del sistema Royal Building entre las juntas machihembradas de los moldes, para cada uno de los diseños de dosificaciones de mezclas, además de las probetas normalizadas, se prepararon dos probetas atípicas con moldes de este sistema.

Estas probetas se confeccionaron de una altura de 15 cm, largo variable entre 20 y 30 cm y el espesor propio de los moldes del sistema. El largo de las probetas garantizaba la existencia de al menos una junta machihembrada por cada uno de los dos lados. Tanto la superficie como el fondo de las probetas, una vez endurecido el hormigón, se protegieron con capas de parafina con el objetivo de hacer inmunes esas caras a la acción de penetración de iones cloruros. Fotos de estas probetas, junto a las probetas normalizadas para los restantes ensayos, se pueden apreciar en la figura 2.



Figura 2: Probetas normalizadas y atípicas con moldes de PVC para los cuatro diseños de mezclas
(Fuente: elaboración propia)

La influencia de los iones cloruro sobre las ocho probetas atípicas confeccionadas, se obtuvo a partir de la aplicación de una niebla salina a la intemperie, obtenida con disolución de cloruro de sodio al 3%, con el propósito de simular el aerosol marino, procedimiento ya comprobado experimentalmente en Cuba [10,15]. La solución se aplicó cinco veces al día, entre el amanecer y la caída de la tarde, por un período de dos meses. En la figura 3 puede apreciarse el proceso de aplicación de la niebla salina mediante un spray.

La aplicación de la solución salina al 3% bajo estas condiciones, está comprobado que representa 850 mg/m²días de deposición de iones cloruro, condiciones que recrean el ambiente agresivo costero del Mariel [15].

Para cuantificar la penetración de iones cloruros fue empleado el método de Vollhard, que permite obtener la concentración de iones cloruros por peso de cemento y que está descrito en la norma cubana NC 344 [17]. El procedimiento consiste en extraer muestras de hormigón a diferentes profundidades mediante un taladro, determinando experimentalmente la concentración de iones cloruros a cada una de ellas.



Figura 3: Fotos con proceso de aplicación del aerosol con solución salina (Fuente: elaboración propia)

Para ello a la edad especificada, en este caso a los dos meses, se procede a retirar el encofrado perdido de PVC de las probetas con cuidado de no afectar el hormigón. Libre de la superficie protectora de PVC, en las líneas definidas de las juntas machihembradas se realizan perforaciones leves en el hormigón a profundidades de 1 cm, 2 cm, 3 cm y 4 cm. Tanto de la superficie, como de cada una de las profundidades señaladas se extraen pequeñas porciones de hormigón, que se terminan de triturar en el mortero. El método de Vollhard consiste en pesar inicialmente 2 g de la porción, secarla a temperatura entre 105°C y 110°C para luego verterla en un recipiente. Luego se agregan 100 ml de agua destilada y 50 ml de ácido nítrico, se hierve durante 20 minutos y se deja enfriar. A la solución se le añaden 20 ml de nitrato de plata y 10 ml de acetona, agitando hasta la floculación del precipitado de cloruro de plata. Al precipitado se le añaden 2 ml de sulfato de amonio y hierro. Es entonces que se le comienza a añadir la solución de tiocianato de potasio hasta que se mantenga por espacio de 20 s aproximadamente el color pardo rojizo, midiendo la cantidad de esta solución. Previamente se ha hecho este mismo proceder, pero sin la muestra de 2 g de hormigón, determinando el volumen de tiocianato de potasio necesario para alcanzar el color pardo rojizo [15-17], lo que se toma como patrón. Todo el proceder se efectuó en el laboratorio de química de la ENIA provincial de La Habana, unidad certificada.

La concentración de iones cloruros en peso de cemento se calcula por la expresión 1 [15,17].

$$Cl^- = \frac{(A - B) \cdot N \cdot 0,03546}{M} \cdot 100 \quad , \% \quad (1)$$

Siendo en ella:

A : Volumen de la solución de tiocianato de potasio empleado para que la solución sin hormigón alcance el color pardo rojizo, ml.

B : Volumen de la solución de tiocianato de potasio empleado con la muestra, ml.

N : Normalidad de la solución de tiocianato de potasio.

M : Masa de la porción de hormigón ensayada, g.

3. RESULTADOS

Con seis de las ocho probetas normalizadas confeccionadas para cada uno de los cuatro diseños de mezclas, se realizaron consecutivamente ensayos de densidad en estado endurecido, resistividad, ultrasonido y, por último, resistencia a compresión a 28 días.

Los resultados del ensayo de densidad en estado endurecido, realizado en correspondencia con la norma cubana NC-ISO 7265 [17] del año 2005, se aprecian en la tabla 2.

Los resultados del ensayo demuestran, en primer lugar, que no hay diferencias significativas entre el primer ensayo y su réplica, lo que es reflejo de la calidad en el control de los procedimientos de pesaje de la materia prima y su mezclado. En segundo lugar, que el valor promedio de la densidad del hormigón endurecido obtenido en cada uno de los diseños de mezcla, corresponde a un hormigón de densidad normal, entre 2300 kg/m³ y 2400 kg/m³, aunque para el diseño de muy alta agresividad medio ambiental se pasa ligeramente. Y

por último, que ocurre un descenso lógico de la densidad con la disminución del nivel de agresividad considerado en el diseño de la dosificación, lo que se explica por la disminución en el consumo de cemento, que es el material de mayor peso específico.

La medición de la resistividad se efectuó con un resistómetro weber de cuatro sondas. Su objetivo, verificar el riesgo de corrosión del posible acero de refuerzo a colocar en el interior de los elementos de hormigón en cada uno de los cuatro diseños, atendiendo a las recomendaciones del fabricante, procedimiento empleado por diversos investigadores para conocer el comportamiento del hormigón y los riesgos de corrosión del acero de refuerzo [18]. Igual que en el caso de la densidad, el ensayo se efectuó a las tres probetas de cada amasada. A las probetas se le hicieron cuatro mediciones de resistividad, calculando en base a ellas el promedio, así como el promedio de cada uno de los diseños de mezclas. Los resultados pueden apreciarse en la tabla 3.

Tabla 2: Resultados del ensayo de densidad en estado endurecido a las probetas normalizadas

Nivel de agresividad de la dosificación	Número de la probeta	Densidad del hormigón en el ensayo principal (kg/m ³)		Densidad del hormigón en el ensayo réplica (kg/m ³)	
		Valor individual	Promedio	Valor individual	Promedio
Muy alto	1	2413,36	2412,60	2407,22	2408,44
	2	2413,87		2412,76	
	3	2410,58		2405,33	
Alto	1	2390,67	2390,49	2393,27	2392,73
	2	2394,11		2389,53	
	3	2386,69		2395,38	
Medio	1	2382,53	2384,33	2377,85	2382,62
	2	2384,86		2383,46	
	3	2385,59		2386,54	
Bajo	1	2381,40	2382,62	2375,88	2378,56
	2	2384,21		2380,05	
	3	2382,25		2379,76	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Resultados del ensayo de resistividad a las probetas normalizadas

Nivel de agresividad de la dosificación	Número de la probeta	Medida promedio de la resistividad en el ensayo principal (kΩ/cm)		Medida promedio de la resistividad en el ensayo réplica (kΩ/cm)	
		Promedio individual	Promedio	Promedio individual	Promedio
Muy alto	1	13,62	13,73	13,42	13,09
	2	13,90		12,89	
	3	13,67		12,96	
Alto	1	11,25	11,41	11,65	11,52
	2	11,47		11,03	
	3	11,50		11,87	
Medio	1	10,80	10,99	11,04	10,96
	2	11,25		10,89	
	3	10,92		10,96	
Bajo	1	9,82	9,85	10,02	9,90
	2	9,97		9,88	
	3	9,75		9,81	

Fuente: Elaboración propia

Si se comparan los resultados del ensayo de resistividad con las especificaciones de la Red Durar del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), se llega a la conclusión que el acero de refuerzo que se coloque en el hormigón correspondiente al diseño de mezclas para bajo nivel de agresividad, presenta alto riesgo de corrosión; contrario a ello, los otros tres diseños sólo poseen moderado riesgo de corrosión. Este es un elemento importante a tener en cuenta para los objetivos de la investigación.

El ensayo de velocidad del pulso ultrasónico se efectuó con el objetivo de verificar los criterios obtenidos sobre densidad y uniformidad de las mezclas diseñadas [19]. Se realizaron de acuerdo con las regulaciones de la norma cubana NC 231 del año 2002 [17] empleando para ello el equipo marca PROCEQ del laboratorio del CECAT. Sus resultados se aprecian en la tabla 4.

De acuerdo con las especificaciones de la Red Durar, al obtenerse en todos estos resultados individuales y promedios una velocidad del pulso ultrasónico superior a los 4000 m/s, se está en presencia de hormigones de densidad normal, mezclados uniformemente, bien compactados, sin oquedades ni porosidad excesiva, lo que corrobora la calidad de los procedimientos de confección de las probetas y de las propias dosificaciones. También se aprecia disminución lógica de la velocidad del pulso ultrasónico con la disminución de la densidad en estado endurecido.

Tabla 4: Resultados del ensayo de velocidad del pulso ultrasónico a las probetas normalizadas

Nivel de agresividad de la dosificación	Número de la probeta	Velocidad del pulso ultrasónico en el ensayo principal (m/s)		Velocidad del pulso ultrasónico en el ensayo réplica (m/s)	
		Promedio individual	Promedio	Promedio individual	Promedio
Muy alto	1	4898	4918	4852	4878
	2	4906		4894	
	3	4950		4888	
Alto	1	4845	4875	4853	4874
	2	4890		4891	
	3	4890		4879	
Medio	1	4831	4831	4846	4847
	2	4831		4844	
	3	4831		4852	
Bajo	1	4831	4831	4830	4830
	2	4831		4832	
	3	4831		4828	

Fuente: Elaboración propia

Terminados los ensayos no destructivos, las seis probetas normalizadas se sometieron a ensayos de resistencia a compresión, siguiendo las regulaciones de la norma cubana NC 244 [17]. Al calcular la resistencia característica real de los hormigones propios de cada diseño, se consideró una desviación típica del lote de 1,5 MPa, como es característico de las plantas dosificadoras y mezcladoras del Mariel. Los resultados de la resistencia a compresión individual de las tres probetas normalizadas por amasada se aprecian en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados del ensayo de resistencia a compresión a las probetas normalizadas

Nivel de agresividad de la dosificación	Número de la probeta	Resistencia a compresión en el ensayo principal (MPa)			Resistencia a compresión en el ensayo réplica (MPa)		
		Individual	Media	Característica real	Individual	Media	Característica real
Muy alto	1	37,04	36,44	34,43	37,63	37,12	35,11
	2	36,42			37,15		
	3	35,87			36,58		
Alto	1	36,88	36,22	34,21	36,32	35,96	33,95
	2	36,23			35,86		
	3	35,56			35,69		
Medio	1	35,23	34,95	32,94	35,04	34,66	32,78
	2	34,89			34,82		
	3	34,74			34,13		
Bajo	1	33,33	32,91	30,90	33,12	32,60	30,59
	2	32,78			32,58		
	3	32,63			32,09		

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de la resistencia característica real en los ensayos de compresión de las probetas, demuestra que el diseño efectuado es racional, en todos los casos superior a los 30 MPa de resistencia característica exigida por proyecto a 28 días. También se aprecia una tendencia de descenso lógica desde el diseño de muy alta agresividad a baja agresividad.

Los resultados de estos cuatro primeros ensayos ponen de manifiesto que los diseños ejecutados han sido rigurosos y cumplen con las especificaciones normadas y requerimientos exigidos para los hormigones hidráulicos de cemento portland que se emplean en obras que se ejecuten por la Empresa Constructora del Mariel por el sistema Royal Building. No obstante, se efectuó un quinto ensayo muy relacionado con los criterios de durabilidad, el de porosidad efectiva.

Este ensayo se efectuó de acuerdo a las regulaciones establecidas en la norma cubana NC 345 [17]. Para ello, aserrando las dos probetas normalizadas que quedaban, se confeccionaron probetas de 30 mm de espesor cubriendo los laterales con parafina derretida. De cada amasada se colocaron en lecho de arena húmeda tres probetas. El incremento del peso de las probetas se determinó a los tiempos establecidos en la norma, determinando en base a ello la porosidad efectiva. Los resultados pueden apreciarse en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados del ensayo de porosidad efectiva

Nivel de agresividad de la dosificación	Número de la probeta	Porosidad efectiva en el ensayo principal (%)		Porosidad efectiva en el ensayo réplica (%)	
		Valor individual	Promedio	Valor individual	Promedio
Muy alto	1	3,92	4,12	4,14	4,11
	2	4,43		4,22	
	3	4,02		3,98	
Alto	1	5,65	5,84	5,76	5,84
	2	5,81		5,79	
	3	6,06		5,98	
Medio	1	6,16	6,74	6,12	6,48
	2	6,47		6,67	
	3	7,59		6,65	
Bajo	1	7,44	6,91	7,34	7,47
	2	6,11		7,25	
	3	7,18		7,82	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de porosidad efectiva para cada uno de los diseños cumplen con los requisitos plasmados en la norma cubana NC 120 del año 2018 [17], de 10% máximo para los niveles de agresividad alto o muy alto; y de 15% máximo para los niveles de agresividad medio y bajo. Incluso, en estos dos últimos diseños, no sobrepasa el 10%.

Hasta aquí, los cuatro diseños efectuados para diferentes niveles de agresividad cumplen las especificaciones normadas. Luego, para condiciones ambientales en las que imperen esos criterios, sin tener en cuenta la posible protección secundaria de los encofrados perdidos de PVC, son los diseños de dosificaciones a emplear.

Queda entonces valorar los resultados del ensayo de concentración de iones cloruros en proporción al peso de cemento a diferentes profundidades, efectuado según el método de Vollhard ya descrito [15-17] en la superficie del hormigón junto a las juntas machihembradas y a profundidades de 1 cm, 2 cm, 3 cm y 4 cm. La figura 4 muestra el proceso de extracción de muestras por barrenado una vez retirado el encofrado perdido de PVC a edad de 60 días.

Los resultados del ensayo de concentración de iones cloruros en la superficie y a diferentes profundidades se pueden apreciar en la tabla 7, tanto para el ensayo principal como para su réplica, ya que se confeccionaron dos probetas atípicas para cada diseño.

Comparando los resultados con las especificaciones de la norma cubana NC 120 [17], donde se plantea que la máxima concentración de iones cloruros permisibles en relación con el peso de cemento es de 0,2%, puede apreciarse que a excepción de la superficie del hormigón en el entorno de la junta machihembrada, en que la concentración de iones cloruros en peso de cemento oscila entre 0,2133% y 0,3108%, superior a lo que plantea la norma, a profundidades entre 1 cm y 4 cm la concentración de iones cloruros está por debajo del máximo permisible en las especificaciones normadas.



Figura 4: Extracción de muestras para el ensayo de concentración de iones cloruros

Tabla 7: Resultados del ensayo de determinación de la concentración de iones cloruros en peso de cemento

Nivel de agresividad de la dosificación	Profundidad de toma de la muestra (cm)	Concentración de iones cloruros (%)	
		Ensayo principal	Ensayo réplica
Muy alto	Superficie	0,2206	0,2133
	1	0,1073	0,0913
	2	0,0578	0,0548
	3	0,0413	0,0348
	4	0,0278	0,0248
Alto	Superficie	0,2393	0,2298
	1	0,0908	0,1178
	2	0,0413	0,0330
	3	0,0330	0,0297
	4	0,0248	0,0248
Medio	Superficie	0,2889	0,2546
	1	0,1486	0,1343
	2	0,0743	0,0578
	3	0,0413	0,0348
	4	0,0165	0,0165
Bajo	Superficie	0,3108	0,2903
	1	0,1560	0,1343
	2	0,1030	0,0960
	3	0,0865	0,0630
	4	0,0548	0,0465

Fuente: Elaboración propia

Ello permite inferir que el encofrado perdido de PVC empleado en el sistema Royal Building garantiza una adecuada protección a la penetración de los iones cloruros del ambiente costero del Mariel, incluyendo el hormigón en contacto con las juntas machihembradas entre los moldes del sistema, con independencia del nivel de agresividad medio ambiental, pudiendo ser diseñados siempre dosificaciones para hormigones considerando bajos niveles de agresividad, por cuanto además de cumplir con las prestaciones normales reguladas para las obras, inhiben la penetración de los iones cloruros provenientes del aerosol marino existente en el perfil costero del Mariel.

Este resultado es de excepcional importancia para el ahorro de cemento portland, por cuanto no es necesario en estas obras, al producir el hormigón para los principales elementos estructurales, emplear los consumos de cemento habitualmente exigidos para niveles de agresividad muy alto, alto o medio. El cofre perdido de PVC inhibe la penetración de iones cloruros, pudiendo efectuarse los diseños de las dosificaciones para bajo nivel de agresividad medio ambiental, siempre que se cumpla con las especificaciones mecánicas.

4. CONCLUSIONES

De la investigación realizada se extraen las siguientes conclusiones principales:

El hormigón diseñado para las obras a construir por el sistema Royal Building cumple con las especificaciones normadas para los diferentes niveles de agresividad imperantes, avalado por los resultados de los ensayos de densidad en estado endurecido, resistividad, velocidad del pulso ultrasónico, resistencia a compresión y porosidad efectiva.

La aplicación de la solución salina al 3% a las probetas atípicas confeccionadas protegidas con el encofrado perdido de PVC, que recrea las condiciones del ambiente agresivo costero del Mariel, demuestra que este encofrado, incluyendo la zona de contacto del hormigón con las juntas machihembradas de los moldes, garantiza protección contra la penetración de los iones cloruros generados por el aerosol marino desde profundidad de 1 cm en adelante.

Este anterior resultado posibilita emplear siempre dosificaciones de hormigón diseñados para bajos niveles de agresividad, lo que permite un ahorro de cemento por metro cúbico de hormigón respecto a otros niveles de agresividad de: Para agresividad media: 38 kg; para agresividad alta: 81 kg; y para agresividad muy alta: 15 kg.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. F. Straube, Buildings, Enclosures and the Royal Building System, Ontario: Dept. of Civil Engineering & School of Architecture University of Waterloo, 2004.
- [2] M. Reesa Y., M. Faiz M., N. Sahidah S., M. Fadhil M. and M. Nurfaizal B., "Industrialized Building system plan of work", International Review of Management and Marketing, vol. 6, No. 7, pp. 299-305, 2016.
- [3] Royalco S.A., Royal Building System, Ottawa: Canadian Construction Material Centre, National Research, 2017.
- [4] G. Rivera. L., Resistencia del concreto in Concreto simple, 1ra. Edición. Cauca: Editora de la Universidad de Cauca, 2013.
- [5] C. Videla and O. Parada, "Predicción de la resistencia potencial del hormigón", Revista de Ingeniería de Construcción, vol. 5, pp.17-34, 1988.
- [6] S. L. Cha, S. S. Jin, G. H. An, and J. K. Kim, "A prediction approach of concrete properties at early ages by using a thermal stress device", Journal of Construction and Building Materials, vol. 178, pp. 120-134, 2018.
- [7] R. Puig, M., Llanes and A. Fernández, "Diseño de mezclas para las obras de la Zona Especial de Desarrollo del Mariel", presented at the 19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, 2018.
- [8] Z. Mi, Y. Hu, Q. Li, and Z. An, "Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete," Journal of Construction and Building Materials, vol. 169, pp. 403-413, 2018.
- [9] R. Berenguer, A. Passos, E. C. B. Monteiro, P. Helene, A. Just, R. Oliveira et al., "Verificación de penetración de cloruros en probetas parcialmente sumergidas en agua de mar en Recife, Pernambuco", Revista ALCONPAT, vol. 8, No. 2, pp. 108-122, 2018.
- [10] M. Barrios F., C. Tejada T. and A. Villabona O., "Método de perfiles de difusión de cloruros para la variación de la corrosión en ambientes marinos", Revista Perspectiva, vol. 14, No. 1, pp. 23-27, 2016.
- [11] C. Tejada Tovar, A. Villabona O. and Y. P. Villabona D., "Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas de hormigón armado sumergidas en agua sintética", Revista ION, vol. 26, No. 1, pp. 55-62, 2013.
- [12] E. F. Félix, T. J. Rodríguez B., M. Correa P., E. Possan and R. Carrazedo, "Análisis de la vida útil de estructuras de hormigón armado bajo la acción de la corrosión uniforme por medio de un modelo con RNA acoplado al MEF", Revista ALCONPAT, vol. 8, No. 1, pp. 16-29, 2018.
- [13] P. Saura G., "Inhibidores en el inicio y propagación del proceso de corrosión de las armaduras en el hormigón armado". PhD Thesis: P.Garcés T., M. C. Andrade P., E. Zornoza G., Universitat d'Alacant, España, 2017.
- [14] R. Vera, J. Román, M. Puentes, M. Bagnara, A. M. Carvajal and P. Rojas, "Efecto de la difusión de ion cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado. Resultados preliminares", Revista de la Construcción, vol. 12, No. 1, 2013.

- [15] J. L. Pérez D., E. A. Godínez D., M. D. Mundo M. and D. Hernández C., "Inspección por corrosión y estructural de un elemento de concreto reforzado interno", Revista Espacio I + D, vol. IX, No. 22, 2020.
- [16] N. K. Santamaría D., L. E. Yamín L. and C. A. Arcila L., "Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno", Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes, No. 23, pp. 48-57, 2016.
- [17] Normas Cubanas, "Control de la calidad y especificaciones de áridos, cementos y hormigones", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2000-2018.
- [18] C. Andrade and R. D'Andrea, "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, vol. 1, No. 2, pp. 93-101, mayo-agosto 2011.
- [19] R. Solís, "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", Revista de Ingeniería, vol. 8, No. 2, pp. 41-52, 2014.