



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**USO DE CONCRETOS DE ALTAS PRESTACIONES EN OBRAS AFECTADAS POR
LA ACCIÓN DEL ION CLORURO EN CUBA.**

E. J. Pérez-García¹, P. Castro-Borges^{2*}, V. O´Reilly-Díaz³

1 Facultad de Arquitectura del ISPJAE, Municipio Marianao, la Habana Cuba,

2 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Km. 6 Antigua Carretera a Progreso, 97310, Mérida, Yucatán, México

3 Ministerio de la Construcción, Avenida Carlos Manuel de Céspedes, Plaza de la Revolución, la Habana Cuba.

RESUMEN

Es conocido el deterioro de las construcciones de concreto armado por problemas de durabilidad asociados a varios factores entre los que se incluye fundamentalmente el efecto del medio ambiente y la acción del ion cloruro, como ha sido el caso de los puentes de Cayo Coco en Cuba. Para controlar este efecto se contaba con varias posibilidades, una de las cuales es un método económico y eficiente que tiene que ver con una correcta dosificación de la mezcla. Esto implica poder preparar mezclas que además de su alta resistencia mecánica tengan alta impermeabilidad a los agentes agresivos, producida en parte por las características de los agregados que propicien una mayor tortuosidad en los poros de la pasta. Este trabajo muestra resultados relativos a la rehabilitación de los puentes de Cayo Coco, cuya inspección arrojó problemas graves de corrosión por cloruros y en los que el empleo de concreto de altas prestaciones con base a uno de los métodos de dosificación mas utilizados en América permitió controlar el problema. Se describen y discuten los pormenores del diseño experimental y los resultados obtenidos en el laboratorio y en pruebas industriales.

Palabras clave: Dosificación, concreto, durabilidad, altas prestaciones, agentes agresivos.

ABSTRACT

Deterioration of concrete by corrosion problems is very well known in environments where chloride action is strong like in the Coco Key, Cuba. A method of concrete mixture developed in Cuba was one of the possibilities to control this effect in new concretes. This method produces economical concrete and the prepared mixtures present high mechanical resistance as well as a very strong pore tortuosity. This work describes results of using this method for the rehabilitation process of Coco Key bridges where the detailed inspection showed strong corrosion problems. The experimental design and the results of this rehabilitation process are discussed here.

Keywords; Concrete mixture, concrete, durability, high performance, aggressive agents

INTRODUCCIÓN

El hormigón es una piedra artificial que se deriva de piedras naturales, ello hace que el producto resultante sea un material relativamente barato. Producirlo con calidad y de acuerdo a las características que exige el medio que circunda la estructura que se construirá con él, permite seguir disfrutando sus cualidades excepcionales y su uso masivo como material de construcción. Cada día son mayores las exigencias de prestaciones a las estructuras de hormigón⁽¹⁾, lo que obliga a un mejoramiento en el uso de sus materiales componentes, los aditivos, las adiciones y su proceso tecnológico de producción que garanticen sus optima propiedades mecánicas a diferentes edades, así como su durabilidad frente a los agentes agresivos. En algunas investigaciones^(2,3,4) se describe que para lograr un hormigón durable se deben diseñar las mezclas con baja relación agua - cemento (a/c), lo cual es importante pero puede conducir a obtener hormigones mal proporcionados, que pueden tener una baja relación a/c y sin embargo ser altamente porosos.

El desarrollo de la humanidad ha sido fundamentalmente en zonas portuarias costeras, como medio de garantizar las comunicaciones. En sus inicios no se conocía en toda su magnitud los efectos del aerosol marino, que con el cursar del tiempo, se ha estudiado con profundidad, en concordancia con las manifestaciones de daños en construcciones elaboradas con hormigón.

En la actualidad se han fomentado zonas turísticas en las costas y cayos en general que tienen grandes volúmenes de construcciones elaboradas con hormigón. Las estructuras de hormigón construidas no solo deben satisfacer los requisitos de resistencia mecánica, sino que además garantizar su durabilidad en función de la vida útil proyectada. Ante las cada vez mayores exigencias se desarrollaron científicamente aditivos, adiciones, métodos de proporcionamiento y tecnologías que los garanticen. Existe además el criterio de que solo con áridos naturales, se alcanzan las exigencias actuales.

Características del viaducto y sus puentes

El Viaducto Turiguanó-Cayo Coco fue puesto en operaciones en 1989. Su ubicación puede apreciarse en la Figura 1, el viento predominante en la zona es del noreste. Sus condiciones atmosféricas y características de construcción provocaron, después de doce años de puesto en funcionamiento, daños por corrosión severos en varios de sus puentes. Los puentes están ubicados según se describe en la Tabla 1, donde el kilómetro cero corresponde a la costa de Turiguanó.



Figura 1. Ubicación Viaducto Turiguanó-Cayo Coco

Los 14 puentes están distribuidos irregularmente a lo largo del viaducto, uno se construyó basculante, de estructuras metálicas, los restantes fueron ejecutados según el proyecto típico de puentes para carretera en Cuba, con vigas de hormigón armado, potenziada, prefabricada todas

con los mismos materiales, en el mismo centro de producción e idéntica resistencia característica a los 28 días.

Tabla 1. Características y posición de los puentes.

Puente No.	Ancho	Cantidad de Luces	Desde la línea de Costa (m)	
			Entrada	Salida
1	80 m	4 de 20 m	620	720
2	40 m	2 de 20 m	1 080	1 120
3	Basculante	Metálico	1 640	1 660
4	20 m	1 de 20 m	1 960	1 980
5	20 m	1 de 20 m	2 390	2 410
6	20 m	1 de 20 m	2 690	2 710
7	20 m	1 de 20 m	2 990	3 010
8	20 m	1 de 20 m	3 270	3 300
9	20 m	1 de 20 m	3 600	3 620
10	40 m	2 de 20 m	4 360	4 400
11	80 m	4 de 20 m	4 590	4 670
12	20 m	1 de 20 m	SIN DATOS	
13	20 m	1 de 20 m		
14	40 m	2 de 20 m		

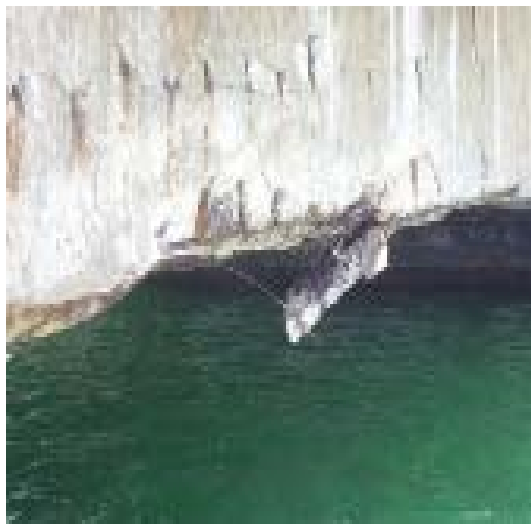


Figura 2. Manifestación del primer síntoma de corrosión de la barra de acero en las vigas y desprendimiento del recubrimiento inferior por corrosión de la barra.

A sólo 12 años de explotación del viaducto, se encuentran ejemplos concretos de corrosión, fundamentalmente en los puentes donde la explosión del hormigón ha dejado al descubierto las estructuras interiores del acero, que en la actualidad están fuertemente corroídas como se observa en las fotos tomadas en la tesis de Maestría de uno de los autores (12). Además

previamente realizamos un estudio que demostraba la influencia de diferentes factores en la forma de los perfiles de cloruros(14).



Figura 3. Desprendimiento del recubrimiento y pérdida de sección de la barra de acero.

Objetivo de la investigación

Se realizó esta investigación para producir hormigones de elevado desempeño que satisfagan las crecientes necesidades de producirlo para estructuras sometidas a fuerte aerosol marino, elaboradas con los cementos disponibles en el país y áridos gruesos y finos de origen calizos triturados, empleando diferentes métodos de dosificar^(5,6,7) como son el de Rothfuchs, el de Modulo de Finura, el ACI y el de O'Reilly.

Investigación

La dosificación del hormigón es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de este, como elemento protector del acero de refuerzo⁽⁸⁾. En resumen, la dosificación es el arte de balancear los componentes de la mezcla de un hormigón que de forma económica garanticen las exigencias mecánicas y de durabilidad.

Los nuevos conocimientos científicos avalados por la práctica de producción⁽⁹⁾, aportan que en el diseño de las mezclas de hormigón hay que tener en cuenta los siguientes factores que garanticen su máxima compacidad, mínimo de poros y por ende, su durabilidad:

- a) La forma de proporcionar los áridos componentes de la mezcla, que garantice el menor volumen de vacío que será ocupado por la pasta de cemento endurecida.
El porcentaje de vacío del conjunto granular de una mezcla para hormigón, determina el volumen de pasta necesario para alcanzar una determinada docilidad. La mayor influencia de los agregados en el consumo de pasta se debe a la forma y la textura superficial de estos. Un caso común surge cuando se deben dosificar hormigones con áridos que tienen distintas formas y texturas de sus partículas.
- b) La influencia que ejerce la cantidad de agua de la mezcla en la consistencia del hormigón en estado fresco.
- c) Lo determinante que es la relación agua - cemento, la cual podrá ser mejorada sustancialmente con el uso de aditivos químicos.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



- d) El grado de hidratación del cemento en la cantidad de poros del hormigón endurecido.
- e) La influencia de la "característica de forma" de los áridos que se empleen, en la calidad final del hormigón.

METODOLOGÍA

Siguiendo los principios antes enunciados se comenzó por determinar la relación óptima de los áridos que disponemos para la producción de hormigón. Se realizaron combinaciones de arena y grava por diferentes métodos de dosificación, obteniéndose los siguientes resultados:

RESULTADOS

Tabla 2. Resultados de la combinación por diferentes métodos. Según investigación previa ya publicada ⁽⁷⁾

Método	Rothfuchs	Modulo de finura	A.C.I.	O'Reilly
Proporción Arena: grava	38: 62	34 : 63	35 : 65	45 : 55

En todos los casos se determinó el porcentaje de vacío generado por cada uno de los métodos, dando el menor porcentaje por el Método O'Reilly⁽⁶⁾. Se observó que todos los áridos gruesos de forma irregular, obtenidos por trituración, requieren de una cantidad de arena mucho mayor, por dicho método, que los que se obtienen por el método basado en la granulometría óptima. Por los estudios comparativos entre diversos métodos de dosificar hormigón se usó el Método O'Reilly ⁽⁶⁾ para realizar la investigación, al tener en cuenta que este método:

1. Determina la forma de proporcionar los áridos, por el método de volumen mínimo de vacío creado por el.
2. Tiene en cuenta la "característica de forma" de los áridos grueso
3. Incluye en su ecuación, la influencia directa de la consistencia del hormigón en estado fresco, en la resistencia del hormigón.
4. Determina de forma más exacta la cantidad de agua, necesaria para una consistencia requerida.

Materiales empleados

- Áridos o Agregados : de origen calizos, triturados (arena y grava)
- Cemento: Pórtland
- Aditivo: Súper plastificante de base lignosulfonato.
- Silica Fume: con un contenido de SiO₂: mayor de 87% (amorfo).

Materiales para un m³ de hormigón

Se elaboraron pruebas de orientación para precisar el comportamiento de los materiales empleados, para la mezcla final, para lo cual se seleccionó de las calculadas la siguiente:

Tabla 3. Materiales para un m³ de Hormigón en Kg. calculado sobre la base de la proporción óptima de agregados según el Método de O'Reilly ⁽⁶⁾

Cemento	Arena	Gravilla	Agua	Aditivos	Silica Fume
---------	-------	----------	------	----------	-------------



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



500	767	938	150	5	40
-----	-----	-----	-----	---	----

Resultados físicos – mecánicos

De las diferentes mezclas estudiadas seleccionamos la que su consistencia obtenida es 12 cm. medida en el Cono de Abrams ⁽¹⁰⁾, a la cual determinamos su resistencia ⁽¹¹⁾, porosidad y capilaridad ⁽⁹⁾ a diversas edades.

Tabla 4: Resultados resistencia a compresión del hormigón endurecido según la Normativa Cubana al efecto ⁽¹¹⁾

Edad	No. Muestra	Media MPa.	Desviación MPa.	Porosidad %
3 días	26	39.3	0.43	3,1
	30	33.9	1.19	3,5
	34	31.8	0.63	4,2
7 días	27	54.8	0.75	5,2
	31	54.3	0.63	5,2
	35	50.8	0.63	5,8
	28	71.2	0.70	7,2
	38	75.2	0.33	6,7
28 días	42	77.7	0.63	6,5
	46	72.6	0.38	7,0
	39	71.4	0.33	7,1
	40	75.2	0.66	6,8
	29	85,2	0.70	8,1
	32	86,2	0.65	8,2
56 días	36	84,7	0.68	8,2
	3	86,2	0.71	8,3
	1	84,6	0.35	8,5
	44	86,7	0.68	8,7

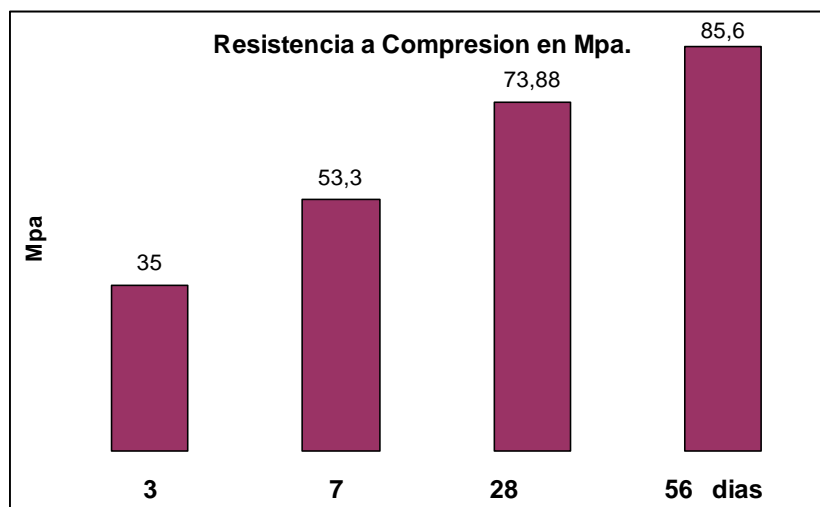


Figura 4. Incremento de la Resistencia a Compresión con la edad



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Tabla 5. Capilaridad del hormigón endurecido determinada según el método de ensayo propuesto por Göran Fagerlund tomado del Manual de la RED DURAR ⁽⁹⁾

Edad	Capilaridad					
	Resistencia a la penetración		Coeficiente de Absorción capilar		Porosidad efectiva	
	m (s/m ²)		K (kg/m ² s ^{-1/2})		€ (kg/m ³)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
3 días	962137290	5239390	435	20.2	0.059	0.005
	656689170	4763520	470	24.8	0.052	0.005
7 días	1177281400	755926	361	8.14	0.045	0.002
	1030877300	1281114	336	7.44	0.048	0.002
28 días	1977281400	3918841	240	13.7	0.019	0.001
	1930877300	6746787	201	29.6	0.012	0.003
	1920428148	1471603	223	15.6	0.015	0.002
	1912702560	1323063	265	81	0.018	0.001
56 días	2435496400	4377056	285	14,5	0.021	0.002
	2389092300	7205002	246	31,2	0.015	0.001
	2378643148	1929818	268	16,4	0.018	0.005
	2370917560	1781278	310	82	0.023	0.005

Rediseño de la Dosificación:

Partiendo de los resultados logrados en la investigación anteriormente expresada, ajustamos la dosificación a las exigencias necesarias para la obra seleccionada. Para dicha obra se solicitó un hormigón con una resistencia característica a los 28 días de 35.0 MPa. y una porosidad menor al 10 % por el ambiente agresivo a que esta sometida, resultando las siguientes cantidades:

Tabla 6: Dosificación para un m³ en kg. que cumple con los requisitos de proyecto y elaborada según el Método de O'Reilly ⁽⁶⁾

Cemento	Arena	Grava	Agua	Silica	Aditivo
450	870	895	180	40	4.5

Tabla 7. Comportamiento de la Resistencia a la compresión a las diferentes edades de esta dosificación.

No.	R'bm 7 días(MPa)				R'bm 28 días(MPa)				R'bm 56 días(MPa)			
	1	2	3	Media	1	2	3	Media	1	2	3	Media
1	28,3	29,5	30,4	29,4	39,2	39,3	39,6	39,4	58,8	59,0	59,4	59,1
2	27,2	28,0	28,5	27,9	36,3	36,8	37,7	36,9	55,9	56,7	58,1	56,9
3	29,7	31,1	31,2	30,7	40,6	41,0	43,6	41,7	58,9	59,5	63,2	60,5



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



4	33,5	34,2	35,1	34,3	39,2	41,0	41,5	40,6	56,8	59,5	60,2	58,8
5	40,9	43,0	44,6	42,8	46,1	49,0	49,1	48,1	61,3	65,2	65,3	63,9
6	32,3	32,4	33,5	32,7	40,3	40,3	40,9	40,5	60,5	60,5	61,4	60,8
	Media			33,0	Media			41,2	Media			60,0
	Desviación			5,3	Desviación			3,7	Desviación			2,4

Los resultados de la resistencia a compresión del hormigón relacionados en la Tabla 6 expresan la validez de la dosificación realizada, pero no son suficientes para demostrar la durabilidad obtenida, para ello se realizaron pruebas de indicadores de durabilidad frente al medio de fuerte aerosol marino que estará sometida la estructura a construir. Se realizaron ensayos de porosidad del hormigón según el Manual de la RED DURAR(9) y determinación de la penetración del ion cloruro mediante la colocación de muestras en cámara de niebla salina, ambos resultados se observan en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Resultados del ensayos de Porosidad a los 56 días según el Manual Red Durar(9)

No. Muestra	Coeficiente de Absorción capilar		Porosidad Efectiva ϵ (kg/m ³)
	k (kg/m ² s ^{-1/2})		
1	435		0.019
2	470		0.012
3	361		0.015
4	336		0.018
5	240		0.021
6	201		0.015
Media	445		0.017
Desviación	15.9		0.003

El promedio de los resultados en la Porosidad efectiva ,0.017 kg/m³ , reflejados en la Tabla 8 aseguran un hormigón durable ante ambiente de acción del ion cloruro como recomienda el Manual de la RED DURAR (9)

Tabla 9. Resultados de la penetración del ion cloruro según la ASTM C-1152-90 ⁽¹³⁾ en porcentaje del peso total de la muestra que estuvo colocada en la cámara de niebla salina, del CENIC, La Habana, Cuba.

Muestra	Profundidad en mm., medido desde la cara exterior				
	10	20	30	40	50
	% en peso de cloruro según ASTM C-1152-90				
1	0.25	0.22	0.12	0.05	0.00
2	0.22	0.18	0.17	0.04	0.00
3	0.22	0.20	0.15	0.01	0.03
Media	0.23	0.20	0.15	0.03	0.01

Se observa en la Tabla 9 que la penetración del ion cloruro a 10, 20, 30, 40 y 50 mm del borde exterior de las probetas, medido en porcieto del peso total de la muestra .Son resultados menores a el 0,4 % máximo recomendado por el Manual de la RED DURAR⁽⁹⁾



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



CONCLUSIONES

Con la investigación realizada, se logra obtener de forma hormigones de elevado desempeño, con áridos calizos triturados, pudiéndose sustituir elementos de hormigón armado muy deteriorados, por la acción del ion cloruro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de la Construcción (MICONS), por financiar parte de los trabajos, al Laboratorio central de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) que realizó los ensayos de Cloruros, al CINVESTAV del IPN, Unidad Mérida, al CONACyT por su apoyo parcial en la movilidad de los investigadores y algunas fases de la investigación y a la Ing. Mercedes Balancán en el tratamiento de las imágenes y formato del artículo. Los puntos de vistas expresados aquí son de los autores y no necesariamente de las instituciones participantes.

REFERENCIAS

1. Comité Euro-International du Béton. Durable Concrete structures. Design guide. Lausanne, Thomas Telford (1992).
2. American concrete institute. Guide to durable concrete: reported by ACI committee 201. ACI materials journal, v. 88, n. 5, sept./oct. (1991): pp. 544-82.
3. C. Andrade, J. A. González, "Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras", Informes de la construcción **40**, 398 (1988): pp. 7-14
4. M.C. Andrade, Manual de inspección de obras dañadas por corrosión (1989).
5. ACI Committee 211, "Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavyweight And Mass Concrete", Aci Manual Of Concrete Practice, ACI, Farmington hill, USA, part I (1991).
6. V. O'Reilly, Métodos para dosificar mezclas de hormigón. Editorial Científico Técnica.
7. V. O'Reilly, E. J Pérez - García, "Dosificación de un hormigón duradero", CONPAT95, La Habana, Cuba (1995.)
8. Comité Euro-International du béton. Ceb-fip model code 1990. Design code. Lausana, CEB, may 1993. 437p. (bulletin d'information, 213-214)
9. CyTED. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. Red iberoamericana XV. B. "DURAR". (1997)
10. NC 174.2002.Hormigón Fresco. Medición del Asentamiento por el cono de Abrams. ICS.91.100.10.Edición Marzo (2002)
11. NC 221.2002.Hormigón Elaboración de las probetas para ensayos.. ICS.91.100.30.Edición Marzo 2002.
12. E. J. Pérez-García, I. Seiglie, E. I. Fernández, "Evaluación de los puentes de hormigón armado del pedraplén Turiguanó – Cayo Coco como obra del patrimonio vial de la provincia de Ciego de Ávila, casos: puentes 4, 5 y 6", Tesis de Maestría, Facultad de Arquitectura, La Habana. Cuba, (2001): p.116.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



13. ASTM C-1152-90: Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete; Annual Book of ASTM, Section 4, v. 4.02, Concrete and Aggregates; PA, EE.UU. (1995).
14. E. J. Pérez García, P. Castro- Borges et al. “Influencia de la dirección del viento en los perfiles de cloruros obtenidos en estructuras expuestas en el Mar Caribe. Caso Viaducto Turiguanó-Cayo-Coco en Cuba”, *Materiales de Construcción* **55**, 277(2005).