

Influencia del Contenido de Cloruros Iniciales del Hormigón en el acortamiento de su vida útil

Influence of the Initial Chloride Content in Concrete in the reduction of the design life.

Pilar Alaejos ^a, Víctor Lanza ^b, Susana Fernández ^c,

Alfredo Carrasco ^d, Juan Pablo Pérez ^d Juan Carlos Suñe ^d.

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Área de Ciencia de Materiales. LCEYM, CEDEX, Madrid.

^bDr. Ingeniero Químico. Coordinador de Programa de Durabilidad del Hormigón. LCEYM, CEDEX, Madrid.

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnico del Área de Ciencia de Materiales. LCEYM, CEDEX, Madrid.

^dSubdirección General de Infraestructuras y Planificación Portuaria. Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras.

RESUMEN

La Instrucción EHE -08 (art. 31) establece como contenido inicial de cloruros (Cl⁻) en el hormigón un valor no superior al 0,2% (p.cemento) para hormigón pretensado y del 0,4% (p.cemento) para hormigón armado. En la ponencia se expone un caso real de una estructura portuaria de hormigón armado con problemas de corrosión, cuyo contenido de Cl⁻ inicial resultaba próximo al admitido por la Instrucción (0,4%) y cuya vida útil resultó consecuentemente mermada hasta quedar en menos de la mitad de la teórica calculada. El nuevo Código Estructural introduce requisitos más exigentes al contenido de cloruros inicial en el hormigón con el fin de evitar casos como el aquí expuesto.

ABSTRACT

Spanish normative EHE 08 establishes an initial chloride content below 0,2% (in cement weight) for prestressed concrete and below 0,4% (in cement weight) for reinforced concrete. This presentation reports a real case of a harbour structure with an initial chloride content close to the normative value (0,4%) and how its design life was consequently reduced less than half of the theoretical life calculated. The new Structural Code will require a stricter limit of initial chloride content of the concrete in order to avoid future similar cases.

PALABRAS CLAVE: Cloruros iniciales, hormigón armado, hormigón pretensado, vida útil.

KEYWORDS: Initial chloride content, reinforced concrete, prestressed concrete, design life.

1. Daños observados en la estructura y planteamiento del estudio

El estudio se ha realizado en una obra portuaria tras 9 años de su puesta en servicio. El tipo de hormigón utilizado en la obra fue HA – 35 / B / 25 / IIIc+Qb con un contenido mínimo de cemento de 350 kg/m³ y una relación a/c máxima de 0,45 (exigencias de proyecto). El nivel de control de ejecución fue normal. El cemento empleado fue un CEM II/A-S 42,5 N/SR con un contenido de escoria siderúrgica del 11%. El recubrimiento exigido en proyecto era de 4 cm. A pesar de su corta vida de servicio cuando se realizó el estudio, la estructura mostraba daños generalizados por corrosión, como se observa en las Fig. 1 y Fig. 2.



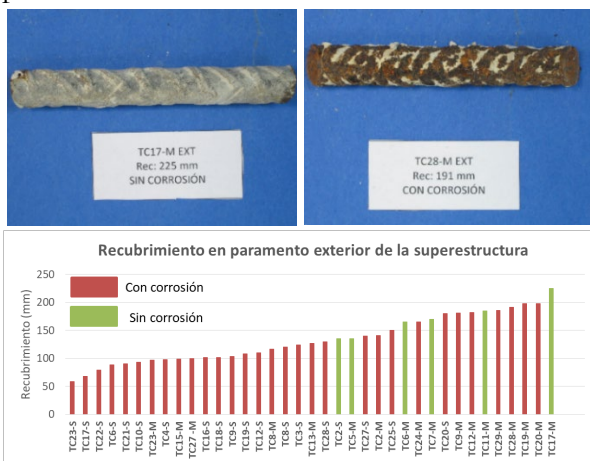
El estudio llevado a cabo ha constado de las siguientes fases:

- Inspección visual de la estructura.
- Análisis de medida de recubrimientos in situ.
- Extracción de testigos.
- Inspección visual de los testigos y armaduras.
- Realización de ensayos de caracterización de la durabilidad: penetración de agua (UNE-EN 12390-8) y perfil de penetración de cloruros (ASTM C114) para estimar el coeficiente de difusión.
- Estudio de vida útil (Anejo 9 de la Instrucción EHE-08).
- Discusión de resultados y elaboración de conclusiones.

2. Extracción de testigos. Inspección de armaduras y recubrimientos.

Se extraen 58 testigos pasantes de los tabiques externos de la estructura. Estos testigos tienen un diámetro de 100 mm y longitud 400 mm aproximadamente. Están tomados a dos alturas diferentes (a uno y tres metros del canto superior del cajón, respectivamente).

Se inspeccionan las barras encontradas en los testigos (diámetro 12 mm) registrando su recubrimiento y si presentan o no corrosión. La Fig. 3 muestra los resultados así como ejemplos de alguna de las barras encontradas en el paramento exterior.



En el paramento exterior, de las 37 barras encontradas (ver Fig. 3), sólo 6 permanecen sin corrosión. Ésta afecta a las armaduras con recubrimiento hasta 198 mm y aquellas con recubrimiento inferior a 130 mm muestran todas corrosión.

En el paramento interior del tabique, de las 34 barras encontradas, sólo 5 permanecen sin corrosión. Ésta afecta a las armaduras con recubrimiento hasta 202 mm y aquellas con recubrimiento inferior a 106 mm muestran corrosión.

Se ha medido el recubrimiento que presentan las barras encontradas. La Fig. 4 muestra los resultados obtenidos.

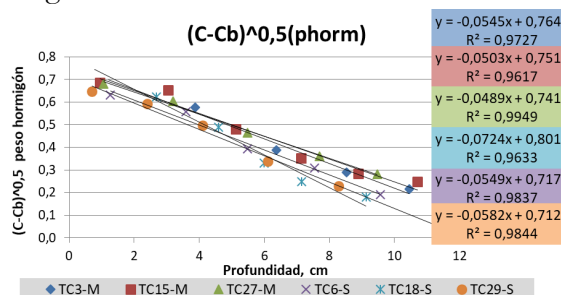


Fig. 4. Recubrimiento y límite exigido en proyecto. Paramento interior.

En proyecto se exigía un recubrimiento nominal de 40 mm. Se observa que los recubrimientos cumplen lo exigido, siendo incluso extremadamente elevados en la mayoría de casos. Se realizan adicionalmente medidas de recubrimiento in situ en el paramento exterior (214 puntos de medida) que determinan que el 73% del hormigón supera el recubrimiento de 90 mm.

3. Perfil de Penetración de Cloruros y Coeficiente de Difusión.

Con los testigos se realizan 6 perfiles de cloruros completos del paramento exterior de la superestructura: tres en testigos extraídos a altura media (M) y tres de la zona superior (S). La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos.



A partir de los perfiles de cloruros se evalúa el coeficiente de difusión aparente a 1 año del hormigón, siguiendo el modelo el Anejo 9 de la Instrucción EHE-08. La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos:

Tabla 1. Coeficiente de Difusión a 1 año

Testigo	D ₁ (x10 ⁻¹² m ² /s)	
TC3-M	16.50	
TC15-M	18.60	18.10
TC27-M	19.20	(Media)
TC6-S	14.30	
TC18-S	10.20	12.30
TC29-S	12.50	(Media)
MEDIA	15.20	
Desviación Estándar	3.53	
Coefficiente de Variación (%)	23%	

El valor medio de coeficiente de difusión a 1 año obtenido es de $15,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s, variando en un rango de 10,2 a $19,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s. Aunque los valores son similares, sí se diferencian los coeficientes de difusión en función de la altura a la que se han extraído los testigos. La zona superior, más alejada del nivel del mar, muestra coeficientes inferiores al hormigón de la zona de altura media.

4. Parámetros de Durabilidad del Hormigón.

Los resultados de difusión de cloruros obtenidos en los testigos (Tabla 1) son muy elevados, comparados con el valor $1,91 \cdot 10^{-12}$ m²/s recogido en el Anejo 9 de la Instrucción EHE-08 para relación a/c de 0,45 (asimilando el cemento CEM II/A-S utilizado en la obra al CEM II/A-V de la tabla).

La Fig. 6 muestra la relación entre penetración máxima de agua en los testigos (medida en la zona de recubrimiento), frente al coeficiente de difusión de cloruros del hormigón. Los valores de penetración de agua también resultan muy elevados, incumpliendo el límite de 50 mm que pedía la Instrucción EHE-98 para ambiente IIIc (vigente para la ejecución de la obra) y aún más los 30 mm que pide la actual EHE-08 en ese ambiente. Se han añadido

en la gráfica algunos resultados de otros elementos (vigas) de la misma estructura fabricados con el mismo hormigón, aunque de mejor calidad y por tanto son los que corresponden a los menores valores de coeficiente de difusión y penetración de agua. El valor normativo de 50 mm de penetración de agua se correspondería en el hormigón de la obra con un coeficiente de difusión de $7,90 \cdot 10^{-12}$ m²/s.

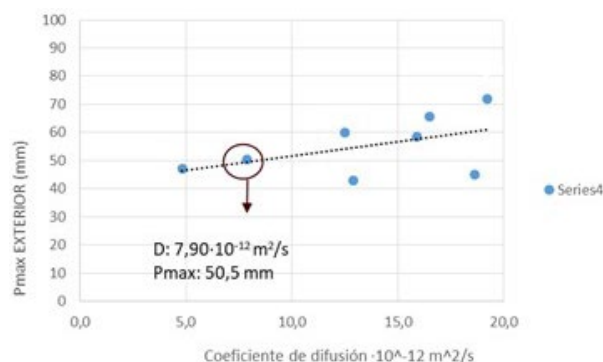


Fig. 6. Relación penetración de agua exterior – difusión. Altura media de la superestructura y viga.

Los resultados de resistencia obtenidos en 48 testigos ensayados señalan un valor medio de resistencia de 43,3 MPa con un coeficiente de variación del 13,8%. Sólo 1 de los testigos no alcanza el valor de 35 MPa especificado en el proyecto. Por tanto el hormigón no presenta problemas de incumplimiento de resistencia aunque sí de durabilidad (penetración de agua).

5. Cloruros iniciales en el hormigón.

Al tratarse de testigos pasantes con dos paramentos expuestos al ambiente marino, se realiza la determinación de cloruros iniciales aproximadamente en la zona central de cada testigo. La Fig. 7 muestra los resultados de siete testigos analizados.

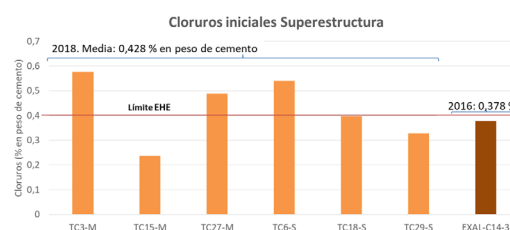


Fig. 7. Cloruros iniciales del hormigón.

Los cloruros iniciales en la superestructura son elevados, en algunos resultados con valor superior al máximo permitido por la Instrucción (0,4% en peso de cemento). Para comprobar que estos cloruros iniciales medidos no están afectados por los aportados desde el exterior (ambiente marino), la Fig. 8 muestra los 6 perfiles ensayados así como la ubicación de los fondos en el testigo. Igualmente, se muestra sombreada la profundidad máxima que han alcanzado los cloruros externos según la Ley de Fick. Al ser los testigos pasantes, se sombrea la misma profundidad en la zona anterior y posterior de los testigos, suponiendo por tanto que el ambiente resulta igualmente agresivo en la cara interior como en la exterior.

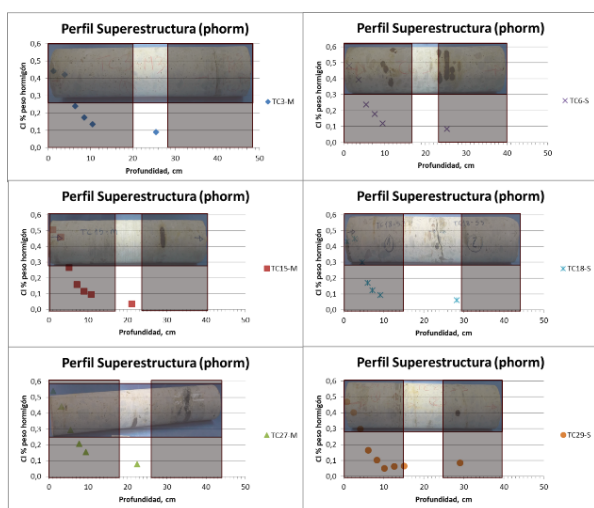


Fig. 8. Ubicación de los fondos en cada perfil ensayado.

De los 6 testigos, hay 4 en los que el fondo evaluado queda claramente fuera del área de influencia del ambiente exterior (zonas sombreadas), de acuerdo con el ajuste a los perfiles de la Ley de Fick. Sólo en el TC6-S y TC29-S los cloruros de fondo podrían estar influenciados por los cloruros exteriores. Esta influencia será baja, ya que es la parte final del perfil de cloruros, y además se ha supuesto que la cara interior del testigo está expuesta a un ambiente tan agresivo como la externa (abierta al mar), hipótesis muy conservadora.

Por tanto, se concluye que los altos valores registrados de cloruros iniciales en el hormigón no están influenciados por el ambiente externo.

Por el contrario, todo parece indicar que alguno de los componentes del hormigón pudiera haber estado contaminado por cloruros en muchas de las partidas utilizadas en su fabricación, con un mayor o menor grado de contaminación que hace fluctuar los resultados en los distintos puntos de la obra. En términos generales los resultados señalan que un 26% del hormigón del espaldón rebasa el valor normativo del 0,4% que exigía la Instrucción EHE-98 y que mantiene la actual EHE-08.

6. Cálculo de vida útil e influencia de los cloruros iniciales en el hormigón.

Se evalúa la vida útil del hormigón de la estructura de acuerdo con el modelo de difusión recogido en el Anejo 9 de la Instrucción EHE-08. Los valores asignados a los diferentes parámetros del modelo se detallan a continuación.

Se adopta el umbral de cloruros de 0,6% (peso de cemento) que propone la Instrucción EHE-08 y un valor de cloruros superficiales igual a 0,416% (peso de hormigón), valor experimental medio de todos los testigos, descontando en cada uno sus cloruros iniciales.

El hormigón colocado en la superestructura presentaba una baja durabilidad, tal como ha quedado reflejado en la Fig. 8. Se utiliza para el cálculo el valor de coeficiente de difusión de cloruros correspondiente a la penetración máxima de 50 mm (valor normativo EHE-98) y que de acuerdo con la figura citada es de $7,90 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Utilizando este valor del coeficiente de difusión, la Fig. 9 y la Tabla 2 muestran cómo han afectado en la vida útil los diferentes cloruros iniciales en el hormigón: 0,0307% (media de los cinco valores más bajos registrados en todos los testigos extraídos de la estructura), 0,2%, 0,4% (límite normativo) y 0,5%. El periodo de propagación pasa de 6 años a 12 aumentando el recubrimiento de 40 mm a 90 mm.

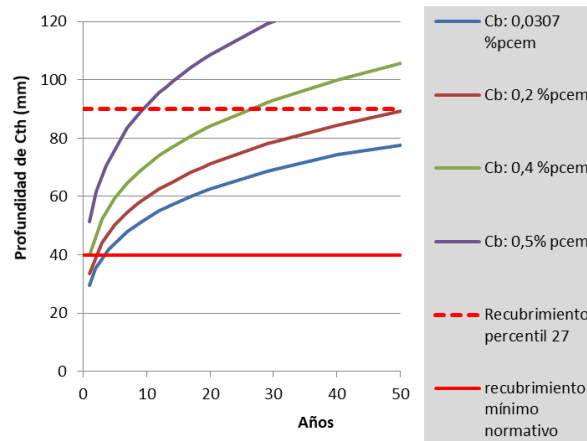


Fig. 9. Influencia de los Cloruros Iniciales en la vida útil.

Tabla 2. Características del modelo de difusión y del hormigón empleado

Características del modelo de difusión		
Cs (sin Cl iniciales)	0.416	% p.horm.
D ₁	7.90	·10 ⁻¹² m ² /s
Cth (EHE)	0.60	% p.cem.
Vel. Corrosión IIIc	50	micras/año
Características del hormigón		
Cemento	350	Kg/m ³
Densidad	2266	Kg/m ³
Rec. Mín Normativo	40	Mm
Recubrimiento p27	90	Mm
Diámetro Armadura	12	Mm
Penetración Exterior	50	Mm

Se observa que con el recubrimiento de proyecto (40 mm) los cloruros iniciales no tienen apenas influencia y la vida útil oscila entre 6 y 10 años. Esto es debido a la baja calidad (alto coeficiente de difusión) del hormigón colocado en la obra, siendo éste el condicionante principal de su durabilidad. La superposición de los elevados cloruros iniciales y la mala calidad del hormigón explican que la vida útil de la estructura se haya reducido a tan sólo 9 años de servicio.

Con recubrimientos mayores, el contenido de cloruros inicial juega un factor más importante en el recorte de la vida útil de la estructura. Así, en la Fig. 10 se representa la relación entre vida útil de la superestructura y los cloruros iniciales del hormigón para el recubrimiento de 90 mm (superado por un 73% de las medidas realizadas in situ). En la figura se observa que con este recubrimiento se hubieran garantizado 100 años de vida en la estructura sin contaminación de cloruros (Cs=0,0307%).

Se incluyen los valores de cloruros obtenidos en los diferentes testigos ensayados y se sombrea en verde la zona en la que se cumple el límite máximo de cloruros iniciales según la Instrucción EHE-98, y en rojo la zona de incumplimiento (cloruros iniciales superiores a 0,4% en peso de cemento). No se muestran cloruros iniciales superiores a 0,6% pccm., ya que este hormigón estaría directamente en el periodo de propagación y su vida útil sería de 12 años, cualquiera que fuera el recubrimiento de la armadura y la calidad del hormigón.

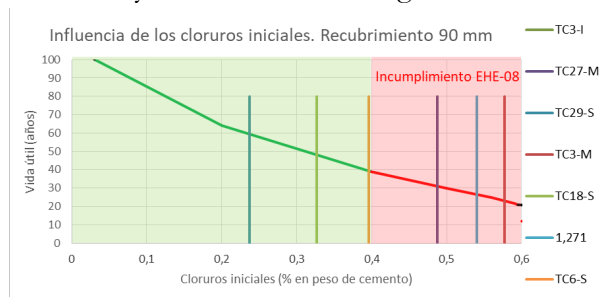


Fig. 10. Periodo de iniciación en función de los cloruros iniciales.

Se observa que todos los testigos ensayados presentan un contenido inicial de cloruros elevado, superior al 0,2% pccm y en todos ellos esto supone un notable recorte de la vida útil de la estructura. La máxima reducción se produce con el valor normativo del 0,4%, admisible de acuerdo con la actual Instrucción EHE-08, pero que recorta la vida útil de 100 años hasta dejarla en 39 años.

7. Conclusiones.

- El presente estudio se realiza para estudiar la corrosión aparecida en el hormigón de los tabiques exteriores de una estructura portuaria con tan sólo 9 años de vida de servicio y que presenta daños generalizados de corrosión. Se han estudiado un total de 48 testigos extraídos de la estructura.

- Los ensayos de resistencia a compresión del hormigón supera el valor requerido en proyecto (HA-35) (48 resultados, un incumplimiento), con un valor medio de 43,3

MPa. Las medidas de recubrimientos realizadas in situ señalan que un 73% de resultados se encuentran por encima de 90 mm.

- Los ensayos de penetración de agua incumplen de forma sistemática el requisito de penetración máxima cuando se evalúa el recubrimiento (media en 43 testigos de valor 75,5 mm). Tan sólo 5 de los testigos ensayados llega a cumplirlo). Esta elevada permeabilidad del recubrimiento ha tenido una incidencia directa en el rápido ingreso de los cloruros en el hormigón hasta alcanzar las armaduras.

- Se han medido los cloruros iniciales en el hormigón de la estructura. Los resultados señalan que un 26% del hormigón rebasa el valor normativo del 0,4% que exige la Instrucción EHE-08. Se ha descartado que estos elevados cloruros medidos en el interior del hormigón puedan estar afectados por el ambiente marino exterior, ya que las determinaciones se han realizado en zonas profundas del testigo que quedan fuera de la influencia del perfil de cloruros inducido por el ambiente. Todo parece indicar que alguno de los componentes del hormigón pudiera haber estado contaminado por cloruros en mayor o menor medida, lo cual también hace fluctuar los resultados en los distintos puntos de la estructura. Se han utilizado los cinco valores registrados más bajos para estimar el contenido de cloruros inicial del hormigón sin contaminación (0,0307% en peso de cemento).

- El cálculo de vida útil de acuerdo con el Anejo 9 de la Instrucción EHE-08 señala que los elevados recubrimientos existentes en la estructura hubieran permitido alcanzar una vida útil de 100 años. Sin embargo, la contaminación de cloruros observada en el hormigón recorta esta vida útil hasta dejarla en 39 años cuando los cloruros iniciales se elevan hasta el 0,4% (requisito normativo). Un 26% del hormigón colocado rebasa incluso este valor originando por tanto reducciones de la vida útil aún mayores.

- Los elevados contenidos iniciales de cloruros junto con la mala calidad del hormigón

colocado explican los problemas de corrosión desarrollados en la estructura de forma tan prematura.

8. Reflexiones finales sobre los requisitos de cloruros iniciales en el hormigón

El caso expuesto muestra la importancia que tiene en la durabilidad de las armaduras el control de los cloruros iniciales presentes en el hormigón. No es realista establecer un contenido nulo de cloruros en los ingredientes que

componen el hormigón, ya que pequeñas trazas de ellos están presentes de forma natural en dichos componentes. Sin embargo, el riesgo de corrosión aumenta con el contenido de cloruros y superado cierto límite y en presencia de humedad y oxígeno que favorezcan las reacciones, la corrosión se produce. Es por ello que todas las normativas internacionales recogen limitaciones al contenido inicial de cloruros del hormigón, aunque se pueden encontrar diferencias en estos límites tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de Cloruros en construcciones según normativas de distintos países.

Normativa	Contenido Límite de Cl ⁻ para nuevas construcciones (% por masa de cemento)					
	Cl-solubles en ácido			Cl-solubles en agua		
	Hormigón Pretensado.	H. Armado Húmedo	H. Armado Seco	Hormigón Pretensado.	H. Armado Húmedo	H. Armado Seco
ASTM C 1152	0.08	0.10	0.20	--	--	--
ASTM C 1218	--	--	--	0.06	0.08	0.15
ACI 318-95	--	--	--	0.06	0.015	1.00
ACI 222 R	0.08	0.10-0.20		--	--	--
ACI 357R	0.06	0.10		--	--	--
EHE-08	0.20	0.40		--	--	--
EN 206-1	0.10-0.20	0.20-0.40		--	--	--
NS 3420-L	0.002	0.60		--	--	--
CP 110		0.35		--	--	--
CEB		0.40 (no especifica si determina cloruros en ácido o en agua)				
Technical Standards for Port and Harbour Facilities (Japón)	0.10	0.20		--	--	--

La primera distinción que se observa es que se puede limitar la concentración de cloruros libres o totales, lo que resulta un tema controvertido. La concentración de cloruros libres se mide mediante la los cloruros solubles en agua y la de cloruros totales mediante los cloruros solubles en ácido. Según se indica en la literatura cuando avanza la corrosión los cloruros combinados pueden liberarse^{5,6} y también los cloruros combinados pueden volver a la disolución por efectos de procesos como la carbonatación⁷. Por este motivo y desde un punto de vista más conservador, la mayoría de

las normativas limitan el contenido de cloruros totales (solubles en ácido), como así lo hace también la Instrucción EHE-08.

En cuanto al valor asignado al límite admisible también la tabla anterior refleja dispersión. Si se determina que el umbral de inicio de la corrosión de las armaduras se encuentra en el 0,6% de cloruros en peso de cemento, admitir un valor del 0,4% de cloruros iniciales en el hormigón supone un recorte importante de la vida útil de la estructura, hasta llegar a perder más de la mitad de vida como ha quedado expuesto en el caso presentado. Se

considera por tanto razonable reducir más este límite, tal como hace parte de la normativa internacional consultada, y en este sentido el nuevo Código Estructural exigirá un valor máximo del 0,2% de cloruros iniciales en los hormigones armados y del 0,1% para los hormigones pretensados, en aquellos casos en que pueda existir un aporte de cloruros desde el exterior (ambientes XD y XS), tal es el caso del hormigón expuesto al ambiente marino XS.

Este valor más restrictivo puede cumplirse por la mayor parte de los hormigones que se colocan en estructuras portuarias, tal como se refleja en la Fig. 11 donde se recogen resultados medidos en el CEDEX en 13 estructuras situadas en ambiente IIIa, IIIb y IIIc.

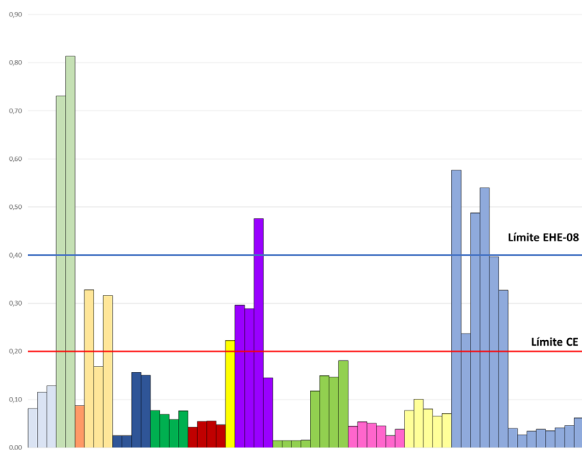


Fig. 11. Datos recopilados en distintos muelles comparados con los del muelle objeto de estudio

9. Agradecimientos.

Se manifiesta el agradecimiento a la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras por su colaboración con la realización del estudio que inspira esta ponencia.

10. Referencias.

- [1] V. Lanza, P Alaejos, Estudio específico de las patologías de corrosión aparecidas en el hormigón armado del dique exento del puerto de Algeciras, Madrid, 2018.
- [2] M.A. Bermúdez, P Alaejos, Estudio

experimental de la durabilidad del hormigón armado en ambiente marino. Zona sumergida y de carrera de mareas. Monografía M-103, CEDEX, Ministerio de Fomento.

- [3] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [4] S.Fernández, P Alaejos, Corrosión de Armaduras en el Hormigón Armado en Ambiente Marino Aéreo. Tesis Doctoral, Madrid 2016.
- [5] ACI Committee 222 (2001). "Protection of metals in Concrete against Corrosion".
- [6] Williamson. G. (2007). "Service Life Modeling of Virginia Bridge Decks". Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute. Blacksburg, Virginia.
- [7] Andrade C., Alonso C., Sarriá J., Castellote, M. (1998). Conceptos básicos sobre corrosión de armaduras. En IETcc. Durabilidad de estructuras de hormigón: vida útil, refuerzo y reparación. XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción. CEMCO 98. Madrid.