

Estudio sobre la concentración de cloruros en superficie de hormigones de estructuras españolas en ambiente marino

Study of the concentration of chlorides at the concrete surface in spanish structures exposed to marine environment

Susana Fernández García¹ y Pilar Alaejos Gutiérrez^{1*}

Palabras clave

corrosión;
cloruros en superficie;
difusión de cloruros;

Resumen

La concentración de cloruros en superficie C_s es un factor fundamental en la predicción de la vida útil de las estructuras expuestas al ambiente marino. Los valores de C_s que se encuentran en la literatura son muy variables por lo que el artículo realiza un estudio específico para estructuras situadas en las diferentes costas españolas. El objetivo del estudio es contrastar estos resultados con los valores límite planteados por la normativa EHE 08 en cada uno de estos ambientes. Se parte de una revisión bibliográfica de valores de C_s y se comparan los resultados con los obtenidos en estudios experimentales sobre estructuras en España ubicadas en ambiente marino IIIa (aéreo), IIIb (sumergido) y IIIc (carrera de mareas). Se analizan los factores que influyen en la concentración de cloruros en superficie tales como la edad de la estructura, el tipo de ambiente al que se encuentra expuesta, la salinidad del mar en el que se localiza, el posible lavado en superficie del hormigón, la distancia a la costa así como la calidad del hormigón. Como conclusión, se ratifican los valores de C_s de la Instrucción para los ambientes IIIa y IIIc, se introduce un valor para un nuevo ambiente (Spray) y se propone una reducción para el caso del ambiente sumergido (IIIb).

Keywords

corrosion;
chlorides at concrete surfaces;
chloride diffusion;

Abstract

Chloride content at the concrete surface (C_s) is an important factor in service life prediction of structures exposed to marine environment, but C_s values found in literature are highly variable. This paper carries out a specific analysis of structures located on different Spanish coasts. Experimental results have been compared to the threshold values established by the Spanish Concrete Structural Code, EHE 08, in each one of the marine environments. The starting point has been a literature review collecting values of C_s in order to compare them with those experimental results obtained from Spanish structures exposed to atmospheric marine environment (IIIa), submerged marine environment (IIIb) and tidal marine environment (IIIc). This paper also analyzes several factors that influence CS such as the age of the structure, the specific environment where it is located, the salinity of the sea, the possible leaching effect on the concrete surface, the distance to the coast and the concrete quality. As a result of this work, a review of the Spanish Code has been proposed: C_s thresholds have been confirmed for atmospheric and tidal environment (IIIa and IIIc), but a new C_s value is introduced for spray environment and, also, a reduction of the value for submerged environment.

1. ANTECEDENTES

La corrosión por cloruros es la principal causa de deterioro en estructuras costeras de hormigón armado y pretensado, aspecto de especial importancia en países con una gran longitud de costa, como es el caso de España¹. Dado que los costes de reparación o rehabilitación de estas estructuras son elevados, se han desarrollado métodos específicos para prevenir el inicio de la corrosión, asignando una vida útil en función de su relevancia^{1,4}.

Los cloruros pueden encontrarse dentro del propio hormigón o penetrar desde el exterior a través de su superficie, como en el caso de las estructuras expuestas al ambiente marino. El avance de los cloruros puede simularse

mediante modelos de difusión con el fin de estimar la vida útil y comprobar que se cumplen los requisitos de proyecto. Estos modelos pueden ser fickianos, probabilísticos, desarrollados mediante elementos finitos o con programas comerciales^{1,4}, siendo los primeros, de carácter más sencillo, frecuentemente utilizados en la fase de proyecto para prevenir la corrosión^{1,5}.

La segunda ley de Fick de difusión permite determinar el tiempo de iniciación de la corrosión, es decir, el tiempo requerido para alcanzar una concentración límite de cloruros en el nivel de las armaduras, tiempo que se asociaría a la vida útil de la estructura^{1,5}. Así, para una losa de profundidad infinita, concentración de cloruros en superficie constante y coeficiente de difusión constante, la expresión de la ley de Fick, según Crack (1975) es la siguiente^{1,3,5}:

$$C_x - C_b = (C_s - C_b) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2} \cdot \sqrt{D \cdot t}\right) \right\}$$

* Autor de contacto: pilar.alaejos@cedex.es

¹ Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.

en la que C_x es la concentración de cloruros a una profundidad "x"

C_s es la concentración de cloruros en superficie

C_b es la concentración de cloruros inicial del hormigón

D es el coeficiente de difusión efectiva de los cloruros

t es el periodo de exposición

erf es la función error

La concentración de cloruros en superficie, C_s , es un **factor fundamental** en la estimación de la vida útil de la estructura ya que representa la carga ambiental. Su valor depende del tipo de ambiente marino al que está expuesta la estructura y si se encuentra en contacto con el agua, de su concentración de sales, del tiempo de exposición a los cloruros y de la dosificación del hormigón (contenido y tipo de cemento, relación a/c...).

Debido al elevado número de factores que influyen, en la revisión de la bibliografía¹ se constata que la concentración de cloruros en superficie presenta valores muy dispersos.

Así, los valores obtenidos en estudios realizados en EEUU^{1,16,17} se encuentran comprendidos entre 1,2 y 8,2 kg/m³ (0,05%-0,35% en peso de hormigón si consideramos una densidad del hormigón de 2300kg/m³). En un estudio realizado en Noruega⁶ en plataformas situadas en alta mar, analizando el efecto de la altura y factores locales como la orientación del viento dominante, el valor medio de C_s de un total de 137 resultados es de 0,63% en peso de hormigón con una desviación típica de 0,43.

Otros autores^{1,7,8} plantean $C_{s_0} = 17,8$ kg/m³ (0,77% peso de hormigón) en el caso del ambiente de carrera de mareas o salpicaduras, y en atmósfera salina, $C_{s_0} = 15$ kg/m³ (0,65% p.h).

El valor que se asigne a C_s en los modelos de estimación de vida útil, tiene una influencia importante en los resultados que se obtengan. Así, la figura 1 representa la relación a/c del hormigón necesaria para alcanzar una vida útil de 50 años, cuando el umbral de cloruros y el contenido de cloruros en superficie varían en el rango recogido por la literatura, así como cuando el recubrimiento varía entre 30 y 70 mm, tanto para los ambientes de carrera de mareas como sumergido. Las condiciones generales de aplicación del modelo (basado en la ley de Fick) se recogen en la tabla 1.

Condiciones generales de aplicación del modelo^{2,3}

Tabla 1. Condiciones generales de aplicación del modelo de cálculo del coeficiente de difusión

	Carrera Mareas	Zona Sumergida
Recubrimiento (mm)	40	30
C_s (% p.hormigón)		0,70
C_x (% p.cemento)	1,0	1,8
Contenido cemento (kg/m ³ hormigón)	350	325
Tipo de cemento		OPC
Vida útil (años)		50

Se observa que la relación agua cemento necesaria en el hormigón, de acuerdo con el modelo utilizado, es sensible a las variaciones de los tres parámetros considerados. En especial se observa la influencia sobre la relación agua/cemento que tiene el contenido de cloruros en superficie que se considere en el cálculo con el modelo.

Tal como se ha comentado anteriormente, la gran dispersión de resultados de C_s encontrados en la literatura puede explicarse por los diversos factores que influyen en su valor.

La salinidad del agua del mar¹ puede tener influencia en los cloruros que se acumulen en superficie. En el caso particular de los **mares que afectan a las costas españolas**, el mar Mediterráneo tiene una concentración de sales mayor que el océano Atlántico y el mar Cantábrico, aunque la diferencia es pequeña.

En cuanto a la **influencia del tiempo de exposición³**, suele expresarse esta dependencia mediante la expresión^{3,19}: $C_s(t) = C_i \cdot t^n$, asignándose valores diferentes al coeficiente de envejecimiento n , según las fuentes. También el ACI 365 IR²¹ señala que no hay conclusiones definitivas para fijar de forma inequívoca una evolución del valor de cloruros en superficie con el tiempo, planteándose soluciones que van desde la progresión lineal hasta la raíz cuadrada.

En particular, el FIB⁹ indica que, aunque C_s varía con el tiempo, en un periodo corto se llega a un valor máximo estable, por lo que para predicciones a largo plazo no es necesario considerar esta dependencia del tiempo.

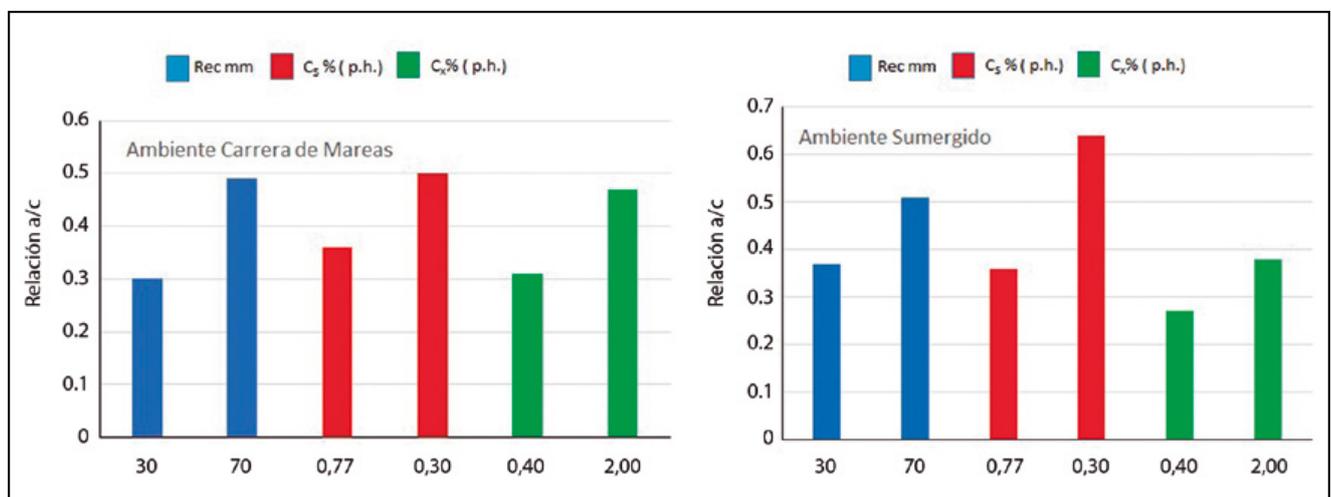


Figura 1. Relación a/c respecto a recubrimiento, C_s y C_x . Ambiente Carrera de Mareas y Sumergido.

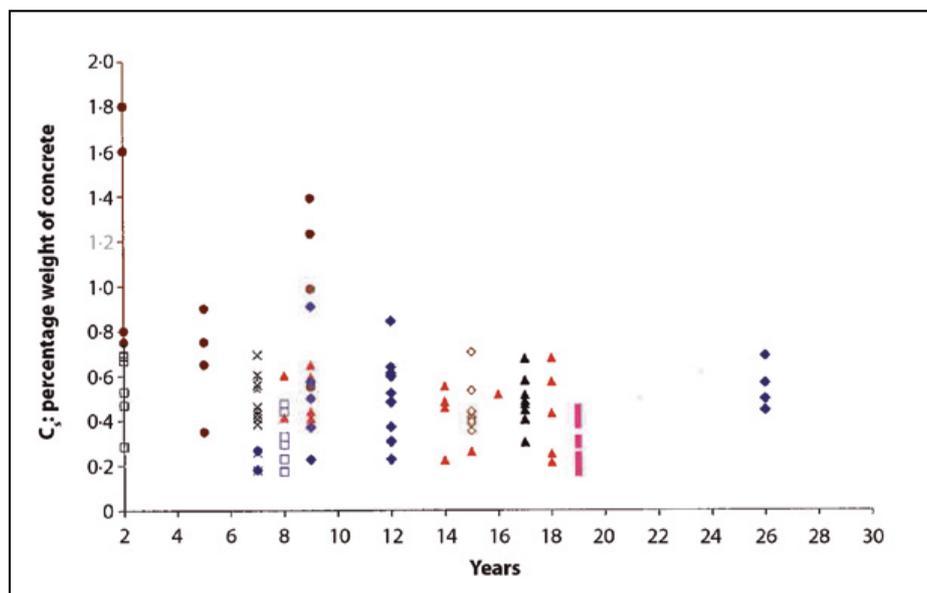


Figura 2. Cloruros en superficie-tiempo. Datos recogidos de nueve estructuras noruegas.

En el caso del estudio realizado en Noruega⁶ sobre plataformas situadas en alta mar, con datos recogidos de nueve estructuras distintas, analizando el efecto de la altura y factores locales, se obtiene la figura 2, que relaciona la edad de la estructura con el contenido de cloruros en superficie en ese momento.

A la vista de los valores representados, las concentraciones de cloruros en superficie que proceden de testigos con edades diferentes pero siempre con más de dos años de exposición, presentan valores similares por lo que el estudio concluye que a esta edad han alcanzado un nivel estable.

En cambio, otros estudios realizados en España²⁰ sobre hormigones situados en carrera de marea (línea de playa) constatan que los valores de C_s siguen aumentando al menos hasta los 15 años de edad, con valores entre el 0,1% a los 2 años y 0,4% a los 15 años (con picos puntuales que alcanzan el 0,6%).

También a la hora de determinar el valor de C_s hay que tener en cuenta que, en la capa superficial del hormigón, puede ser menor el contenido de cloruros por **el efecto de la lixiviación**¹ o de la carbonatación por lo que dicho valor debe descartarse.

Por encima de todos los factores anteriormente citados, el tipo de ambiente marino tiene una influencia determinante en la concentración de cloruros en superficie. En particular, en el ambiente marino aéreo, la **distancia a la costa** es fundamental. Así, en Japón¹⁰ durante la década de los 80 se llevó a cabo un estudio con el fin de determinar la relación entre la cantidad de cloruros disponible en el aire y la distancia a la costa, así como la relación entre la concentración de cloruros en superficie y en el aire. Se recogieron más de 200 datos dentro de los 10km más próximos al mar y a partir de ellos se pudo establecer una relación entre C_{air} (masa media de iones cloruro medidos en un año) y la distancia a la costa d :

$$C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6}$$

donde C_{air} es el nivel de cloruros en el aire (mdd=mg/dm²/día), C_1 es el nivel de cloruros equivalente al valor a

distancia de 1km (mdd) y d es la distancia a la costa (km). C_1 expresa el nivel de cloruros en el aire de cada región según condiciones de viento, oleaje, variaciones estacionales... Así $C_{1A}=C_{1B}=0,6$ y $C_{1C}=0,2$.

En el mismo estudio, la expresión que permite relacionar C_0 (cloruros en superficie de hormigón) y C_{air} es la siguiente:

$$C_0 = 1,5 \cdot (C_{air})^{0.4}$$

Desde el punto de vista normativo, la Instrucción EHE-08¹¹ plantea valores límite de C_s en función del ambiente de exposición así como de la distancia a la costa (en el caso del ambiente marino aéreo), tal y como indica la tabla 2:

Tabla 2. Concentración de cloruros en superficie según ambiente de exposición EHE-08

Clase General de Exposición	IIIa	IIIb	IIIc	IV	
Distancia a la costa	Hasta 500m	500m-5000m	0,72	0,50	0,50
C_s (%p.hormigón)	0,14	0,07			

2. OBJETIVOS

En el presente artículo se pretende analizar los valores experimentales obtenidos en muelles localizados en las costas españolas en los distintos ambientes marinos que plantea la Instrucción EHE 08: IIIa (Aéreo), IIIb (Sumergido) y IIIc (Carrera de Mareas y Salpicaduras) y compararlos con los límites de C_s propuestos, para establecer si resultan acordes.

3. METODOLOGÍA

Para la realización del presente análisis de la concentración de cloruros en superficie se ha llevado a cabo una labor de recopilación de datos procedentes de estructuras ubicadas en los tres ambientes marinos que recoge la Instrucción EHE-08. Dicha tarea corresponde a parte de

Tabla 3. Tabla resumen datos significativos puertos estudio CEDEX ambiente sumergido y carrera de mareas

	Muelle A	Muelle B	Muelle C	Muelle D	Muelle E	Muelle F	Muelle G	Muelle H	Muelle I
Edad (años) ⁽¹⁾	4,5	6,5	30	7,5	5	18	2	2	31
Normativa vigente en el momento de construcción	EH 98	EH 98	HA 61	EH 98	EH 98	EH 80	EH 98	EH 98	HA 61
Localización	Mediterráneo	Mediterráneo	Mediterráneo	Mediterráneo	Atlántico	Atlántico	Cantábrico	Cantábrico	Cantábrico
Distancia a B.M.V.E. del testigo/carrera de mareas (m)	- 0,1/0,8	- 0,1/0,4	- 0,1/0	+ 0,5/0,7	+ 2,5/4,0	+ 1,6/4,0	+ 3,5/4,5	+2,0-3,5 /5,4	+ 1,3/4,5
Ambiente de exposición	Sumergido	Sumergido	Sumergido	Carrera de marea	Carrera de marea	Carrera de marea	Carrera de mareas	Carrera de mareas	Carrera de mareas
Hormigón proyecto (N/mm ²)	H-25	H-25	HA-17,5	H-25	H-25	H-25	HA-30	HA-30	-
Penetración Máxima (mm)	35-45	51	8-48	27,5	80-112,5	54-135,5	6-24	20-42	24-74

⁽¹⁾ Edad del muelle en el momento de la realización del estudio.

Tabla 4. Tabla resumen datos significativos puertos CEDEX ambiente aéreo

Muelle	Muelle A	Muelle B	Muelle C	Muelle D
Edad (año de construcción)	37	26	11	11
Normativa vigente en el momento de la construcción	H.A.61	EH-80	EH-91	EH-98
Localización	Mediterráneo	Atlántico	Cantábrico	Mediterráneo
Distancia B.M.V.E testigo/carrera mareas (m)	+6,50/0	+5,40 (losas)/3,70 +4,70(Cabeceros)/3,70	+5,90/3,80	+1,50/0
Ambiente Exposición EHE	Illa Aéreo	Illa Aéreo	Illa Aéreo	Illa Aéreo
Subambiente ⁽¹⁾	Zona Spray (FIB)	Zona Spray (FIB)	Zona Spray (FIB)	Zona Spray (FIB)
Hormigón Proyecto (N/mm ²)	-	30	25	35
Penetración Máxima (mm)	28-61	26-106	15,5-30	24-47

⁽¹⁾ Edad del muelle en el momento de la realización del estudio.

los trabajos previos realizados por el CEDEX^{1,2,3,12} con el fin de caracterizar la durabilidad de diversos puertos españoles.

A continuación se plantean las tablas 3 y 4 donde se resumen la mayoría de los datos de interés para el análisis de Cs de los puertos estudiados.

En todos los puertos se ha procedido a la extracción de testigos con su posterior envío a laboratorio para determinar el perfil de cloruros, considerando el valor de la concentración de cloruros en superficie como punto más alto del perfil obtenido. El perfil de cloruros se obtiene cortando lonchas de un espesor variable entre 1-2 cm a lo largo de los 15-30 primeros cm del testigo, pulverizándolas y realizando el análisis químico del contenido de cloruros solubles en ácido de acuerdo con ASTM (2012) C1152 "Standard Test method for Acid Soluble Chloride in Mortar and Concrete". En las tablas 5, 6, 7 y 8 se recogen los resultados de Cs obtenidos para cada uno de los puertos analizados.

Al objeto de ampliar los datos de estudio, se han considerado también los resultados obtenidos en otro estudio realizado en España¹³, que emplea probetas de laboratorio con exposición natural en ambiente marino aéreo IIIa, así como varios estudios realizados en distintos países (Japón¹⁴, Portugal¹⁵ y Noruega⁶) donde se emplean muestras

situadas en ambiente sumergido IIIb. Estos datos se recogen en las tablas 5 y 6 respectivamente.

4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de concentración de cloruros en superficie considerados en el estudio realizado.

En la figura 3 se representan los valores de Cs obtenidos para los tres ambientes recogidos en las tablas anteriores. Se han considerado como ambiente IIIa Aéreo, los valores del estudio Torroja puesto que pertenecen a muestras situadas hasta 1000m de la costa. Sin embargo, los datos del estudio CEDEX se han considerado como ambiente IIIa Spray, ya que corresponden a muestras tomadas sobre el nivel del mar y acordes con el criterio planteado por el fib⁹ (el fib considera zona de salpicaduras hasta 1,5m sobre la pleamar y la zona spray es la situada a partir de esta altura). Se han ordenado los cuatro grupos de datos de menor a mayor agresividad desde el punto de vista del ambiente de exposición y dentro de cada uno de ellos, los valores se ordenan también de menor a mayor. Asimismo, se representan los límites del contenido de cloruros en superficie establecidos por la Instrucción EHE-08 para cada ambiente de exposición.

Tabla 5. Valores C_s muestras estudio Torroja.¹³ Ambiente marino aéreo

CCAA Exposición	Designación	C_s (%p. hormigón)
Andalucía	1	0,0812
Cantabria	2	0,1450
Andalucía	3	0,0186
Andalucía	4	0,0774
Andalucía	5	0,1036
Andalucía	6	0,0557
Galicia	20	0,0200
Galicia	21	0,3550
Cantabria	22	0,0900
Andalucía	7	0,0731
Andalucía	8	0,1137
Canarias	9	0,2610
Canarias	10	0,1100
Canarias	11	0,1000
Canarias	12	0,0000
Canarias	13	0,0390
Galicia	14	0,0100
Galicia	15	0,4000
Galicia	16	0,0270
Canarias	17	0,0000
Valencia	18	0,0320
Valencia	19	0,0600

Tabla 7. Valores C_s muestras CEDEX². Ambiente Carrera de Mareas

Muelles	Designación	C_s (%p. hormigón)
	23	0,4842
D-Cm (IIIc)	24	0,4807
	25	0,4944
	26	0,3258
E-Cm (IIIc)	27	0,2034
	28	0,4343
	29	0,2471
	30	0,6620
	31	0,5803
	32	0,4514
F-Cm (IIIc)	33	0,4679
	34	0,5948
	35	0,6500
	36	0,7340
	37	0,3577
	38	0,5945
G-Cm (IIIc)	39	0,5064
	40	0,4195
	41	0,6152
H-Cm (IIIc)	42	0,3483
	43	0,5271
	44	0,2910
	45	0,5010
	46	0,6244
I-Cm (IIIc)	47	0,3604
	48	0,4493

Tabla 6. Valores C_s muestras CEDEX² y bibliografía.^{6,14,15} Ambiente Sumergido

Muelles	Designación	C_s (%p. hormigón)
	67	0,2932
A-Su (IIIb)	68	0,1802
	69	0,0881
	70	0,3257
B-Su (IIIb)	71	0,6498
	72	0,4566
	73	0,2533
C-Su (IIIb)	74	0,0893
	75	0,5426
	76	0,1740
	77	0,2230
Noruega ⁶ (7 años)	78	0,2850
	79	0,3030
	80	0,3180
Portugal ¹⁵ (16 años)	81	0,2400
	82	0,2660
	83	0,4630
Muroran ¹⁴ (60 años)	84	0,3410
	85	0,3710
	86	0,3960
	87	0,4360

Tabla 8. Valores C_s muestras CEDEX.^{1,12} Ambiente Aéreo

Muelles	Designación	C_s (%p. hormigón)
	49	0,3481
A-Ae	50	0,4617
	51	0,2798
	52	0,1751
	53	0,0330
	54	0,0110
	55	0,1530
B-Ae	56	0,0050
	57	0,4790
	58	0,1670
	59	0,4410
	60	0,3280
	61	0,0639
	62	0,0833
C-Ae	63	0,4185
	64	0,3293
	65	0,2478
	66	0,3583
	88	0,0920
	89	0,0563
D-Ae	90	0,0706
	91	0,0493
	92	0,0491

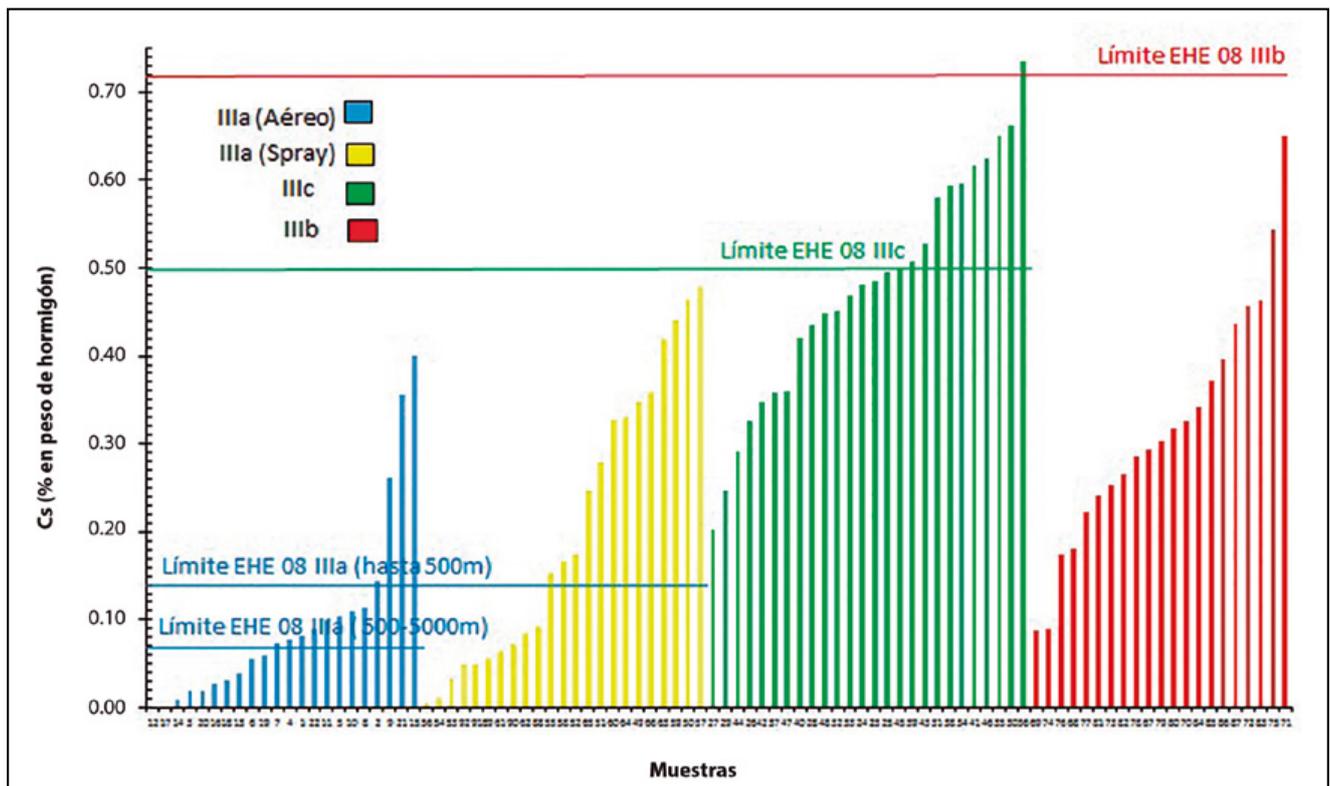


Figura 3. Concentración de cloruros en superficie en ambiente IIIa, IIIb y IIIc.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se analizan los resultados de la concentración de cloruros en superficie obtenidos teniendo en cuenta la influencia que ejerce el ambiente de exposición en el que se encuentra la muestra, el mar en el que se localiza la estructura y la presencia o no de lavado de la superficie del hormigón.

Finalmente se comparan los valores obtenidos con los que actualmente recoge la normativa EHE-08, proponiendo algunas modificaciones.

Influencia de la edad

En la figura 4 se representan los valores medios e individuales de C_s de los muelles del estudio CEDEX^{2,3} en carrera de mareas, ordenados por edad. Se observa en la figura que

el contenido de cloruros en superficie analizado en ambiente carrera de mareas² no experimenta un incremento más allá de los 2 años, tal como se observa en la figura 4 (tanto en los valores medios de cada muelle como en el rango de los valores individuales), obteniéndose valores que fluctúan alrededor del valor medio total representado en las figuras.

Hay que señalar que otra investigación realizada en España²⁰ sobre probetas de hormigón colocadas en línea de playa y sometidas a carrera de marea, sí constata un incremento creciente del valor de cloruros en superficie durante 15 años, aunque con fuertes oscilaciones y acercándose progresivamente a un valor muy similar al obtenido en los puertos analizados en este estudio, si bien en la presente investigación el valor se alcanza en tan sólo 2 años.

En la figura 5 se representan los valores medios e individuales de C_s de los tres muelles españoles^{2,3} en ambiente sumergido ordenados por edad (4,5-6,5 y 30 años de edad

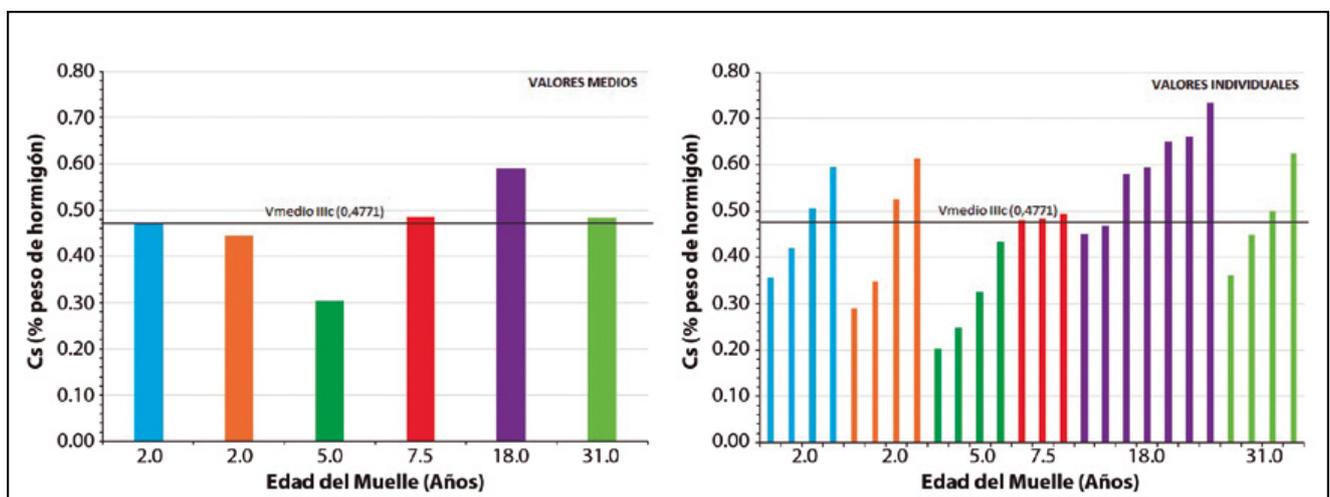


Figura 4. Valores medios e individuales C_s según edad de cada muelle. Ambiente Carrera de Mareas.

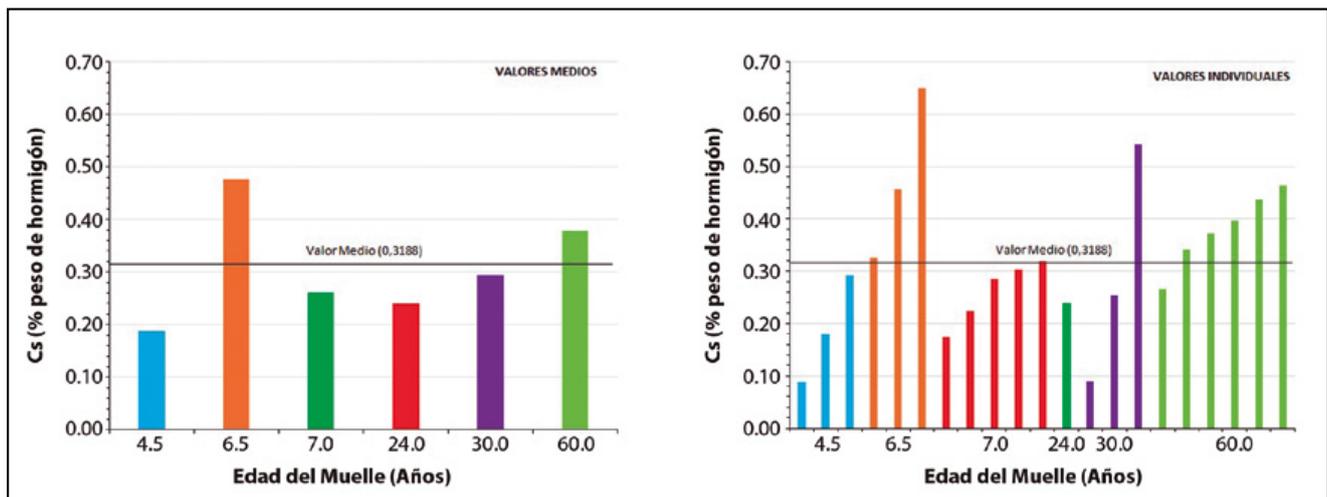


Figura 5. Valores medios e individuales de C_s según edad de cada muelle. Ambiente Sumergido.

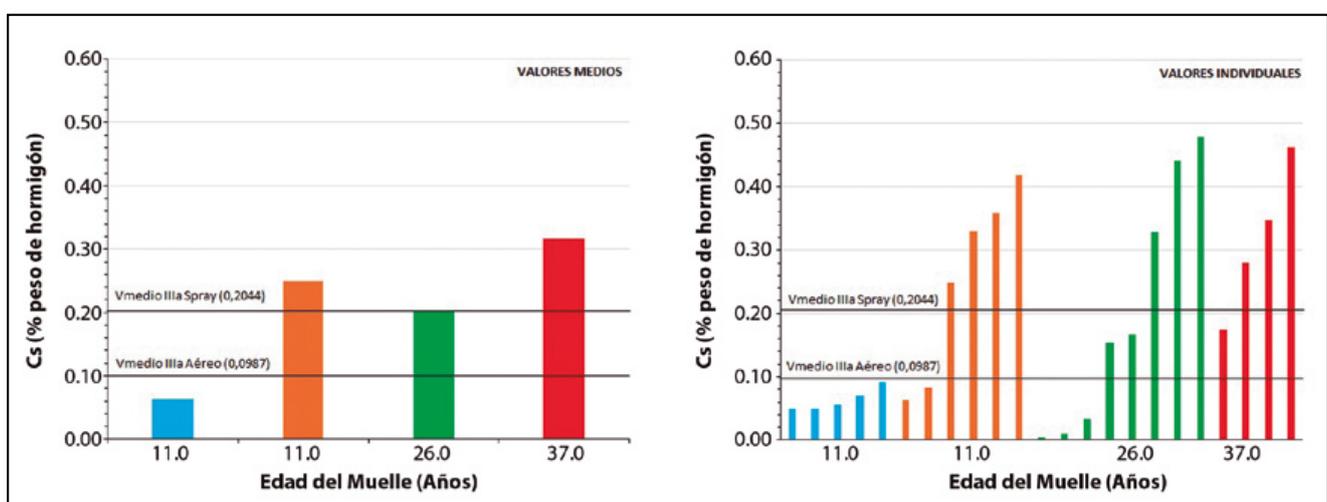


Figura 6. Valores medios e individuales de C_s según edad de cada muelle. Ambiente Aéreo.

cuando se realizó el estudio). Al objeto de ampliar la muestra, se han incorporado también los datos de las estructuras internacionales tomados de la Tabla 6.

Se observa, como en el ambiente de carrera de marea, que no existe una evolución con el tiempo de los valores de C_s , que fluctúan alrededor del valor medio total de los resultados mostrados en la figura.

En el estudio realizado en la presente investigación para ambiente marino aéreo^{1,12}, la figura 6 muestra las edades de los cuatro muelles estudiados así como los cloruros en superficie obtenidos en cada caso, tanto valores medios por muelle como los valores individuales. Se observa que tres de los cuatro muelles presentan valores uniformes a pesar de tener un intervalo de edades entre 11 y 37 años. En el muelle D con 11 años de edad los resultados de todos los testigos son similares y de reducido valor. Estos valores bajos también se encuentran de forma puntual en los otros muelles, en las zonas más resguardadas de los mismos. En el caso del Muelle D se trata de una estructura muy al abrigo del puerto lo cual podría justificar los valores tan bajos de cloruros en superficie (habituales en estructuras en tierra y muy alejadas del mar) y que en principio no deberían ser atribuidos a un efecto de la edad más temprana del muelle.

Por tanto, en los tres ambientes marinos estudiados, con estructuras entre 2 y 60 años de antigüedad no se observa una tendencia creciente de los valores de cloruros en

superficie del hormigón. Los resultados parecen indicar que el hormigón de la superficie se carga con un contenido de cloruros que crece hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente de exposición, lo cual se produce en un corto período de tiempo (alrededor de dos años, en coherencia con lo recogido en la literatura). A partir de ese momento el valor de los cloruros en superficie se mantiene estable, aunque con fluctuaciones alrededor del valor medio que pueden llegar a ser importantes (gran dispersión de resultados) y podrían ser atribuidas a las diferentes condiciones ambientales locales en cada muelle (orientación, viento, etc).

Influencia del tipo de ambiente

La figura 3 muestra de forma clara la gran influencia del tipo de ambiente marino en el valor de cloruros acumulados en superficie.

En particular se observa que los valores de C_s correspondientes al ambiente IIIa aéreo¹³ en general son mayoritariamente inferiores a los valores de C_s del ambiente IIIa Spray^{1,12}, lo cual es coherente ya que en el caso de los primeros, los resultados proceden de muestras que se colocaron en puntos situados a menos de 1000m de la línea de costa en distintas comunidades autónomas de la geografía española mientras que en el caso de los segundos, los

valores siempre se tomaron de muelles portuarios en horrigones sobre el mar.

No obstante, destacan los tres valores mayores del rango IIIa aéreo que sobresalen de la horquilla general. La tabla 9 muestra los valores del coeficiente de difusión para estos datos, observándose que para el caso particular de la muestra 9 el hormigón presenta un coeficiente de difusión extremadamente elevado, más coherente con una exposición al ambiente IIIb ó IIIc. En el caso de las muestras 15 y 21, el valor del coeficiente de difusión es bajo, por lo que sí podrían corresponder a zonas de ambiente IIIa Aéreo, aunque los valores de Cs tan elevados, similares al grupo de barras correspondientes a los datos CEDEX^{1,12} procedentes de la zona de IIIa Spray, inducen a pensar que podría tratarse de muestras justo en la costa (0m). En cualquier caso, al no quedar estas hipótesis confirmadas en la fuente¹³ de donde se han tomado los datos (situación de 0 a 1000m sin datos adicionales), se ha optado por mantenerlos en el ambiente IIIa Aéreo.

Los datos experimentales del ambiente IIIa aéreo recopilados¹³ presentan un valor medio próximo a 0,1% e intermedio entre los dos límites de la Instrucción EHE-08 en

Tabla 9. Valores de C_s y D_1 que sobresalen de la horquilla general de resultados

	C_s (% peso hormigón)	D_1 ($\cdot 10^{-8}$ cm ² /s)
9	0,261	39,00
15	0,400	2,91
21	0,355	0,21

ambiente aéreo (0,14/0,07). Este resultado puede considerarse razonable, ya que como se ha indicado son muestras de varias estructuras situadas a distancias variables hasta 1000m de la costa (sin precisar más en la fuente consultada) y la Instrucción EHE-08 establece la subdivisión de ambos ambientes a la distancia de 500m. Puede pensarse que los valores mayores de la serie podrían corresponder a estructuras situadas dentro de esta franja de distancia y que elevan el valor medio de todos los resultados. En particular, si se recalcula la media de los datos eliminando los tres valores superiores (muy dispares del resto) el resultado es 0,061, coherente con el límite inferior de la Instrucción correspondiente a estructuras de 500 a 5000m (0,07). Por tanto, los datos disponibles no son suficientes para precisar

Tabla 10. Relación de valores medios y característicos de las series anteriores

Valores Cs	Valor Medio	Valor Característico	Datos Empleados	Límite EHE-08
IIIa Aéreo	0,0987	0,2758	22	0,14/0,07 ⁽¹⁾
IIIa Spray	0,2044	0,4698	23	... ⁽²⁾
IIIc	0,4771	0,6978	26	0,50
IIIb	0,3188	0,5494	21	0,72

⁽¹⁾ 0,14 para estructuras hasta 500m de la costa y 0,07 para aquéllas situadas entre los 500m y los 5000m.

⁽²⁾ No se recoge este subambiente en la actual normativa EHE-08: dentro del ambiente IIIc sí se recoge la zona de salpicaduras (sin precisar altura), pero no zona de spray.

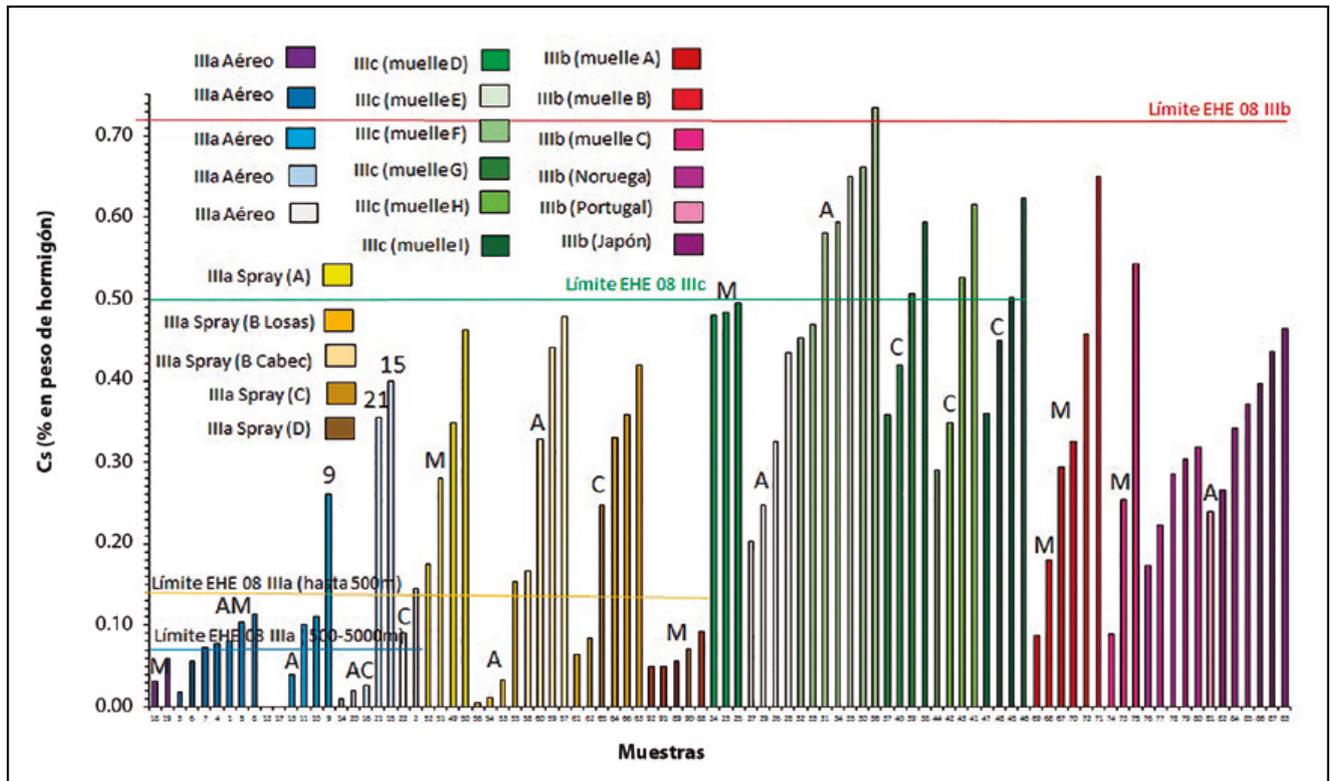


Figura 7. Cloruros en superficie en ambiente IIIa, IIIb y IIIc ordenados por ambientes y por muelles. Las letras entre paréntesis indican la nomenclatura utilizada para designar a los muelles en cada estudio. Las letras M, A, C, AC y AM que se superponen sobre las barras indican el mar en el que se sitúa cada muelle: Mediterráneo, Atlántico, Cantábrico, costa Gallega y costa Andaluza respectivamente.

más pero sí parece que podrían ajustarse razonablemente a lo recogido por la Instrucción EHE-08 en este ambiente.

Sin embargo, un porcentaje muy alto de las muestras analizadas en el presente estudio en ambiente **IIIa Spray** superan el límite para el ambiente IIIa de la Instrucción EHE-08, incluso el valor más estricto planteado hasta los 500m (0,14%) resulta claramente superado

En el caso del **ambiente marino IIIc**, el valor límite planteado por la Instrucción apenas es superado por algunos de los resultados obtenidos mientras que en el caso del **ambiente IIIb**, el límite planteado por la normativa es claramente alto a la vista de los valores representados.

La tabla 10 recoge los valores medios y característicos de los datos representados en la figura 3, el número de muestras empleadas y los límites actualmente establecidos por la normativa EHE-08¹¹. Para calcular el valor característico de cada serie se supone que se trata de variables aleatorias normales.

Para el caso del ambiente IIIb, los valores de la tabla 10 se han calculado considerando también los datos extraídos de la bibliografía. Sin embargo, si los parámetros se determinan utilizando únicamente los datos de puertos españoles (9 datos), los resultados que se obtienen son muy similares: valor medio = 0,3199, valor característico = 0,6430.

Los valores medio y característico correspondientes al rango de valores IIIa Aéreo¹³ se han calculado sin eliminar los tres datos más elevados, tal como se ha comentado anteriormente, lo cual da lugar a un resultado más conservador.

En un apartado posterior se analizan en mayor profundidad los resultados experimentales obtenidos en los diferentes ambientes en comparación con los límites normativos, realizando una propuesta de modificación.

Influencia de la salinidad del mar

En la figura 7 se representan los datos de cada muelle ordenados de menor a mayor, tanto de los procedentes de la bibliografía¹³ como de los muelles estudiados por el CEDEX^{1,2,3,12} para comprobar la posible influencia de aspectos locales de cada muelle.

Se observa en la figura la poca influencia de la zona costera en la que se encuentra el hormigón, obteniendo una variación de resultados similares en los hormigones expuestos a las tres costas españolas: Mediterránea, Atlántica y Cantábrica, dentro del mismo tipo de ambiente marino. Incluso para los casos tomados de la bibliografía de hormigones en una climatología muy diferente a la de nuestro país (Noruega⁶ y Japón¹⁴), los resultados son también comparables a los obtenidos en costas españolas.

Influencia del lavado en superficie

El efecto lavado en superficie se refiere al hecho de que el hormigón más superficial de las muestras analizadas queda expuesto al agua de lluvia o de escorrentía, arrastrando así los cloruros depositados en los primeros centímetros. Por este motivo, los valores iniciales de los perfiles son, en algunas ocasiones, inferiores que los valores más profundos, cuando el contenido de cloruros debería disminuir a medida que se profundiza en la muestra de hormigón presentando su valor máximo al inicio del perfil. En la figura 8 se representan las muestras ordenadas de menor a mayor valor de Cs resaltando aquellas que presentan perfiles de hormigón con efecto lavado en superficie. Se han eliminado los valores correspondientes al estudio de Noruega puesto que no se dispone de su perfil de cloruros y sí han

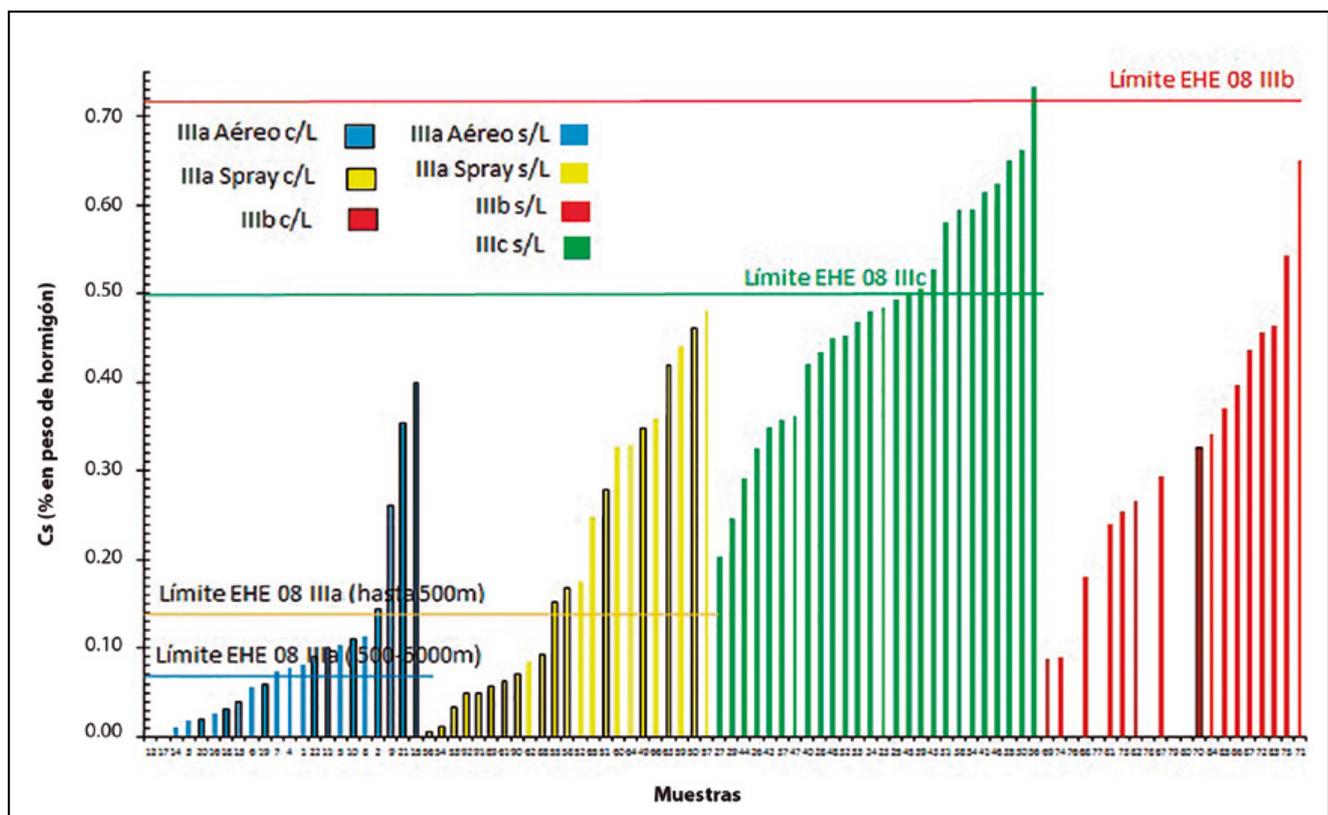


Figura 8. Representación de muestras con efecto de lavado en superficie sobre el gráfico general de valores de Cs. Los valores remarcados corresponden a aquellas muestras con efecto lavado.

podido considerarse los resultados de la tesis consultada en la bibliografía¹³ ya que en ellos se señala la aparición de los casos con lavado, designados como “efecto piel”.

Se observa en la figura que el efecto lavado aparece de forma exclusiva en los perfiles correspondientes al ambiente IIIa, ya que es el ambiente en el que el hormigón puede verse más afectado por el agua de lluvia. No se observan perfiles con lavado en ninguna de las muestras tomadas en ambiente de carrera de mareas (IIIc) y aunque hay un caso en ambiente sumergido (IIIb), se trata de un perfil con una tenue curva inicial que podría estar ocasionada por algún efecto puntual del hormigón.

Por otra parte, en la figura se observa cómo el lavado afecta por igual a hormigones con fuerte concentración de cloruros en superficie como a aquéllos con menor cantidad.

Influencia de la distancia a la costa

La normativa japonesa es la que más importancia da a la distancia a la costa de las estructuras afectadas por el ambiente marino aéreo, entre las estudiadas. Así, Japón divide su zona costera en tres regiones (A, B y C) de acuerdo con las

condiciones climatológicas que aparecen en la tabla 11¹⁸. La región C se considera como zona más afín al ambiente de exposición IIIa puesto que en nuestro país no se producen de manera habitual fenómenos meteorológicos extremos como tifones o vientos de tormenta. Se observa en la tabla 11 que para la Zona C se consideran relevantes sólo los 200 m de franja costera, estableciendo una mayor discretización de la misma en comparación con la división simple en dos subzonas del ambiente IIIa en la Instrucción EHE-08.

En el apartado de antecedentes se ha hecho referencia a un estudio realizado en Japón¹⁰ sobre estructuras costeras que permitía obtener una relación entre el contenido de cloruros en superficie y la distancia a la costa. Si se aplica dicho estudio a las distancias recogidas en la tabla 11 se obtienen los valores de C_s (cloruros en superficie) que se muestran en la misma tabla.

El estudio japonés aplicado a distancias lejanas de la costa (de 500m a 5km) proporciona contenidos de cloruros en superficie muy similares entre sí y muy inferiores a los recogidos en la Instrucción EHE-08 (figura 9), siendo estos últimos más acordes con los resultados experimentales obtenidos en la costa española¹³.

Tabla 11. Discretización de ambientes marinos en la normativa japonesa¹⁸ y contenidos de cloruros en superficie asociados, de acuerdo con el modelo japonés¹⁰

Zona	Distancia costa (km)	C_1	C_{air}	C_s (% ph)
A (ruta de tifones)	0,1	0,6	2,389	0,092
	0,3		1,236	0,071
B (Viento de tormenta en invierno)	0,1	0,6	2,389	0,092
	0,3		1,236	0,071
	0,5		0,909	0,063
	0,7		0,743	0,058
C	0,02	0,2	2,091	0,088
	0,05		1,207	0,070
	0,1		0,796	0,060
	0,2		0,525	0,050

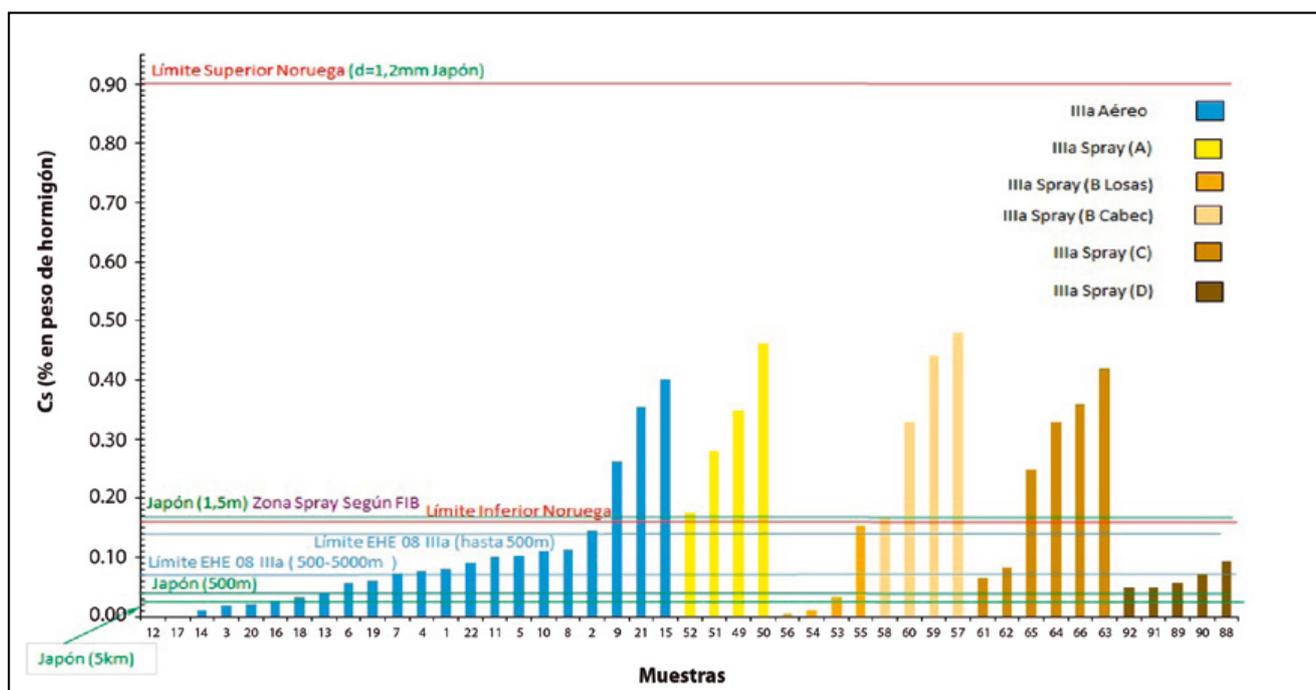


Figura 9. C_s en ambiente IIIa recogidos en la experimentación. Representación de límites españoles, japoneses y noruegos.

Según nos acercamos a la línea de la costa (franja de 200 a 20 m), en la propuesta japonesa los valores de C_s se elevan de forma notable, tal como se observa en la tabla 11. Esto concuerda con la posible necesidad de una mayor discretización del ambiente IIIa en su zona más próxima a la costa para el caso español, ya que actualmente se introducen en el mismo grupo estructuras situadas en la propia costa o sobre el mar, con otras situadas a medio kilómetro de distancia.

Finalmente, si se extrapola el modelo japonés¹⁰ a la zona de spray (1,5 m) se obtiene un valor ajustado a los obtenidos en los puertos españoles situados en esta zona y también en coherencia con el límite inferior de resultados en las plataformas noruegas correspondiente a hormigones situados a nivel del mar (figura 9). Si se extrapolara aún más la propuesta japonesa (1,2 mm representado en la figura 9) los valores de cloruros se disparan y se corresponderían con los límites superiores obtenidos en hormigones de estructuras noruegas al nivel de la superficie del mar. Estos resultados tan elevados quedan muy por encima de los obtenidos en los puertos españoles, lo cual puede atribuirse a que se trata de estructuras que se encuentran en alta mar y en el Mar del Norte, con poca similitud al que pudiera encontrarse en los puertos en España.

Influencia de la calidad del hormigón

Finalmente, se analiza la posible influencia de la calidad del hormigón en los cloruros acumulados en superficie, valorada a partir de los datos de penetración de agua. Así, en la figura 10 se representan los resultados de penetración de agua (estudio CEDEX y estudio Torroja) y

cloruros en superficie medidos en todos los testigos para los diferentes ambientes. Pese a la dispersión de resultados sí se observa que en general se registran, para cada ambiente, mayores valores de cloruros en superficies en los hormigones de peor calidad (mayor penetración de agua). Descartando los valores erráticos, la envolvente de todos los resultados es ascendente.

Muchas de las estructuras representadas en el gráfico anterior son antiguas y la calidad del hormigón no cumple los requisitos de penetración de agua actualmente exigidos por la Instrucción EHE-08. Si se aplican estos parámetros a los resultados que se están analizando, considerando únicamente aquéllos que cumplen el requisito de penetración máxima <50 mm, se obtiene la tabla 12.

Salvo para el caso de ambiente de carrera de mareas, el resto de valores medios se reduce. Esto significaría que para hormigones de buena calidad que cumplen los actuales requisitos de durabilidad de la Instrucción EHE-08 sería de esperar un contenido inferior de cloruros en superficie, lo cual si se mantienen los valores normativos actuales queda del lado de la seguridad.

Propuesta de valores y comparación con la EHE 08

De acuerdo con los resultados analizados y tomando como referencia los valores medios de C_s obtenidos en los hormigones situados en los diferentes ambientes marinos (redondeados al alza) de la tabla 10, se podrían adoptar los valores planteados en la tabla 13 para el cálculo de vida útil. En comparación con lo recogido en la Instrucción EHE-08 se introduce una zona de spray con un nuevo límite y se rebaja el límite de la zona sumergida.

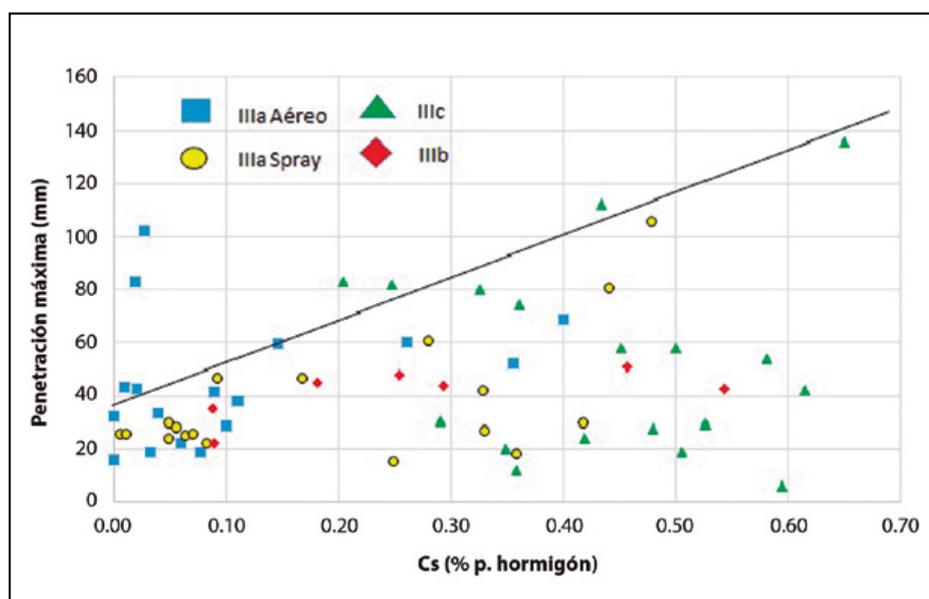


Figura 10. Penetración máxima de agua en IIIa, IIIb y IIIc según el orden de menor a mayor C_s .

Tabla 12. Relación de valores medios y característicos de muestras con $P_{max}<50mm$

Valores C_s	Valor Medio	Valor Característico	Datos Empleados	Límite EHE-08
IIIa Aéreo	0,0490	0,1157	11	0,14/0,07 ⁽¹⁾
IIIa Spray	0,1553	0,3878	15	... ⁽²⁾
IIIc	0,4600	0,6462	9	0,50
IIIb	0,2411	0,5202	6	0,72

tábrico y el océano Atlántico, los resultados de C_s obtenidos en los tres casos no difieren entre sí, ni incluso tampoco al incluir datos procedentes de otros países con climatología muy diferente a la nuestra (Noruega o Japón).

- El lavado en superficie se presenta únicamente en ambiente IIIa, al tratarse de un hormigón expuesto al agua de lluvia. Asimismo, el efecto se produce por igual en hormigones con alto y bajo contenido de cloruros en superficie.
- Los resultados experimentales obtenidos en ambiente sumergido indican la necesidad de proponer **un nuevo valor de cloruros en superficie para al ambiente sumergido IIIb** (0,35%), ya que el actual resulta excesivamente conservador (0,72%).
- Se considera necesario introducir un nuevo valor de cloruros en superficie igual a 0,25%, definiendo (de acuerdo con el criterio del FIB⁹) **una zona spray** en la franja de la estructura que se encuentra a una altura superior a 1,5m sobre el nivel del mar.
- **Los resultados experimentales (valores medios) analizados en este estudio son coherentes** con los recogidos en la Instrucción **para el ambiente IIIa** aéreo y el ambiente **IIIc** de carrera de mareas.

7. AGRADECIMIENTOS

Los Autores desean agradecer la financiación de Puestos del Estado a la presente investigación.

Se agradece al CEDEX el apoyo para el desarrollo de tesis doctorales.

8. BIBLIOGRAFÍA

Fernández, S. (2011). *Corrosión de armaduras en el hormigón armado en ambiente marino aéreo*. Suficiencia investigadora, ETSICCP, Universidad Politécnica de Madrid.

Bermúdez, M. A., y Alaejos, M. P. (2009). *Estudio experimental de la durabilidad del hormigón armado en ambiente marino. Zonas sumergida y de carrera de mareas*, Monografía, M-103, Madrid: Servicio Editorial CEDEX.

Alaejos, M. P., y Bermúdez, M. A. (2008). *Corrosión de las armaduras en el hormigón situado en ambiente marino. Estado del arte*. Monografía, M-96, Madrid: Servicio Editorial CEDEX.

Williamson, G. S., Weyers, R. E., y otros (2009). Concrete and Steel Type Influence on Probabilistic Corrosion Service Life. *ACI Materials Journal*, 106 (1), 82-88.

Williamson, G. (2007). *Service Life Modeling of Virginia Bridge Decks*. Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute. Blacksburg, Virginia (EE UU).

Helland, S., Aarstein, R., y Maage, M. (2010). In field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. *Structural Concrete*, 11 (1), 15-24.

Shafiq, N. (2004). Effects of Fly Ash on Chloride Migration in Concrete and Calculation of Cover Depth Required against the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement. *Structural Concrete*, 5 (1), 5-9.

Berke, N. S., y Hicks, M. C. (1992). Estimating the Life Cycle of Reinforced Concrete Decks and Marine Piles using Laboratory Diffusion and Corrosion Data. En Chaker, Victor (Ed.), *Corrosion Forms and Control for Infrastructure*, ASTM STP 1137, San Diego (California/EE UU), 3-4 noviembre, 1991 (pp. 207-231). Filadelfia (EE UU): American Society for Testing and Materials.

FIB. (2006). *Model Code for Service Life Design*. *fib Bulletin*, 34, Lausana (Suiza).

Tanaka, Y., Kawano, H., y otros. (2001). Study on Required Cover Depth of Concrete Highways Bridges in Coastal Environment. *17th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, Tsukuba (Japón), 1-16.

Ministerio de la Presidencia (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural* (EHE 08). Madrid.

CEDEX, Laboratorio Central de Estructuras. (2015). *Puerto de Valencia. Estudio del hormigón del Muelle de la Aduana*.

D'Andrea, R. (2010). *Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica*. Tesis doctoral, ETSICCP, Universidad Politécnica de Madrid.

Ozaki, S., y Sugata, N. (1988). Sixty-year-old concrete in a marine environment. En Malhotra, V.M. (Ed.), *Second International Conference on Concrete in Marine Environment* (SP-109), St. Andrews by-the-Sea (Canadá). Farmington Hills/Michigan (EE UU): American Concrete Institute (ACI).

Costa, A., y Appleton, J. (2002). Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. *Cement and Concrete Composites*, 24 (1), 169-179.

Cramer, S. D., Covino, B. S., y otros. (2002). Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cement and Concrete Composites*, 24 (1), 101-117.

Stewart, M. G., y Rosowsky, D. V. (1998). Structural Safety and Serviceability of Concrete Bridges subject to Corrosion. *Journal of Infrastructure Systems*, 4 (4), 146-155.

Fukui, J., y Shirato, M. (2005). Performance-based specifications for Japanese highway bridges. En Augusti, G., Schuëller, M., y Ciampoli, M. (Eds.), *Proceedings ICOSSAR 2005 Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures*, Roma (Italia), 19-23 junio. Róterdam (Holanda): Millpress.

Costa, A., y Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment- Part II: Prediction of long term chloride penetration. *Materials and Structures*, 32 (5), 354-359.

Andrade, C., Castellote, M., D'Andrea, R., Picón, J. M., y Sanjuán, M. A. (2009). Difusión de cloruros en hormigones expuestos a ambientes marinos. Estudio de 15 años de exposición. *Cemento Hormigón*, 935, 22-31.

ACI 365.1R-00. (2000). *Service-Life Prediction-State-of-the-Art-Report*.



Reacción álcali sílice en el hormigón con áridos de reacción rápida. Estudio Experimental.

Autores: Víctor D. Lanza Fernández y María del Pilar Alaejos Gutiérrez

Serie Monografías: M-118

SBN: 978-84-7790-544-8

Año: 2013

PVP: 25€

La detección de áridos reactivos con los álcalis del hormigón es fundamental para poder evitar que en el futuro aparezca esta patología, con lo que conlleva en gastos de mantenimiento y reparación para las estructuras. Este estudio experimental se ha realizado con el objetivo final de diseñar una metodología completa para el estudio de áridos españoles de reacción rápida.

Así, partiendo de áridos cuya reactividad es conocida por haber sido extraídos de obras afectadas por la reacción álcali sílice, se han evaluado diferentes ensayos normalizados existentes en la normativa española o internacional: ensayo acelerado de probetas de mortero, ensayo químico, ensayo químico-cinético, y Gel-Pat. Además, se

estudia la aplicación de dos técnicas diferentes para la identificación y cuantificación de componentes reactivos: la difracción de rayos X (no normalizada) y el estudio petrográfico (sin norma que lo desarrolle en España). Finalmente se ha definido un nuevo ensayo que, de una forma fácil y rápida, sea capaz de detectar áridos potencialmente reactivos, diferenciando a los rápidos y los lentos, e ino cuos: el Gal Pat modificado. Los resultados obtenidos han sido válidos para definir una metodología completa de estudio de áridos reactivos, corroborada con la casuística real española.



Reacción álcali sílice en el hormigón con áridos de reacción rápida. Estado del arte.

Autores: Víctor D. Lanza, Fernández y María del Pilar Alaejos Gutiérrez

Serie Monografías: M-119

ISBN: 978-84-7790-538-7

Año: 2013

PVP: 25€

En España es conocido el daño que la reacción álcali sílice (RAS) ha producido en distintas estructuras, daño que conlleva un elevado coste de conservación de las construcciones con esta patología. Para evitar el desarrollo de la RAS en futuras obras de hormigón, es necesario disponer de una metodología que permita, con seguridad y de forma fácil y rápida, diferenciar áridos reactivos e ino cuos. En este libro se recoge el estado actual del conocimiento sobre la detección de áridos reactivos, profundizando en las siguientes cuestiones necesarias para poder caracterizar a los áridos españoles:

- Fundamento de la reacción álcali sílice y factores que intervienen
- Áridos reactivos, analizando los componentes reactivos existentes y en que áridos han sido identificados
- Técnicas para la detección de áridos reactivos y sus limitaciones
- Metodologías para el estudio de la reactividad de los áridos: normativa existente y evolución
- Álcalis disponibles en el hormigón para el desarrollo de la reacción álcali sílice