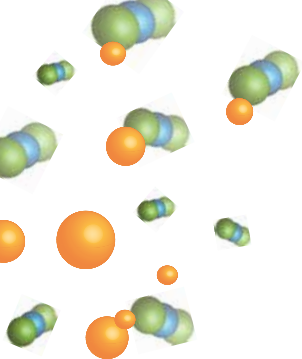


Concentración crítica de cloruros para armaduras de acero inoxidable

1. Introducción

La corrosión de las armaduras es una de las principales causas de la reducción de la durabilidad en las estructuras de hormigón armado. Los principales agentes que provocan la corrosión son la carbonatación del hormigón por la presencia del CO₂ y la entrada de cloruros en el caso de ambientes marinos o sales de deshielo. Estos últimos son los que mayor repercusión tienen en la vida útil de las estructuras [1, 2].

La preocupación por la corrosión de las armaduras debido a la presencia de cloruros ha dado lugar a numerosos estudios para el caso de armaduras de acero al carbono con diferentes enfoques respecto a la parte química: i) unos se centran en el estudio de la concentración de cloruros libres [Cl⁻], ii) otros en la relación de concentración de cloruro / hidróxido [Cl⁻] / [OH⁻] y iii) otros en los cloruros totales como porcentaje en peso de cemento (%CEM) [3]. También hay diversas aproximaciones en cuanto a la metodología empleada, aunque principalmente se han realizado ensayos electroquímicos, hay diversos estudios que incluyen técnicas como curvas de polarización anódica, medidas de velocidad de corrosión (I_{corr}),

gravimetrías, espectroscopía de impedancia electroquímica, etc. [3-18]. En estos estudios se muestran diferentes valores de concentración crítica de cloruros como valor necesario para iniciar la corrosión [3, 19], estos valores son diferentes en función de la metodología de estudio que se haya empleado y las condiciones de exposición, ya sean naturales o ensayos en laboratorio [3-7, 9-18, 20]. En el caso de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) se establece un valor para la concentración crítica de cloruros totales de 0.6% CEM, valor que coincide con los obtenidos en estudios previos realizados en el IETcc-CSIC [21].

El creciente uso de armaduras de acero inoxidable ha derivado en nuevos estudios sobre el límite de cloruros para diferentes calidades. Estudios en disolución muestran que dichos límites son de cuatro a seis veces más altos que el del acero al carbono a valores de pH de 9 a 13 y a una temperatura

estándar de 20°C [22]. Otros autores han encontrado que la concentración crítica de cloruro es 10 veces mayor respecto al acero al carbono para el caso del acero inoxidable austenítico EN 1.4307 y EN 1.4404 [23]. Sin embargo, no existen investigaciones en mortero u hormigón que establezcan los umbrales críticos de cloruros para diferentes calidades de acero inoxidable, puesto que su resistencia varía en función de la microestructura, tipo de aleación y composición [22, 24-27].

El grupo de Corrosión de Armaduras y Seguridad Estructural del IETcc-CSIC en colaboración con ACERINOX ha realizado una investigación sobre la concentración crítica de cloruros de 5 calidades diferentes de acero inoxidable en mortero dentro del proyecto de Investigación Integrada Sobre Islas Sostenibles (IISIS) [28]. En este proyecto se han estudiado dos calidades de acero inoxidable austenítico: EN 1.4307(AISI-

304L) y EN 1.4404(AISI-316L); y tres aceros inoxidables dúplex: EN 1.4482(2001), EN 1.4362(2304) y EN 1.4462(2205)

2. Metodología

La metodología seguida en la investigación está basada en la norma UNE 83992-2 “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado”. El método está basado en aplicar un campo eléctrico externo perpendicular a la armadura embebida en la probeta de mortero/hormigón. El campo se aplica entre un electrodo de cobre situado en un recipiente sobre la probeta con una disolución 0.6 M NaCl y 0.4 M CuCl₂. En la parte inferior se pone una malla de acero inoxidable. De esta forma, el campo eléctrico produce la migración de los iones Cl⁻ hacia la armadura, incrementándose progresivamente su concentración hasta alcanzar la

EN/AISI	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N	PREn
1.4307/304L	0.028	0.308	1.376	18.099	7.978	0.243	0.033	0.034	0.07	19.6
1.4404/316L	0.020	0.291	1.363	16.797	10.481	2.025	0.035	0.03	0.045	23.5
1.4482/2001	0.018	0.687	4.175	20.124	1.815	0.166	0.029	0.0009	0.099	19.5
1.4362/2304	0.016	0.647	1.609	22.730	4.226	0.107	0.034	0.0008	0.143	25.8
1.4462/2205	0.032	0.395	1.616	22.408	4.695	3.341	0.03	0.002	0.173	37

Tabla 1. Calidad, composición e índice PREn de las armaduras

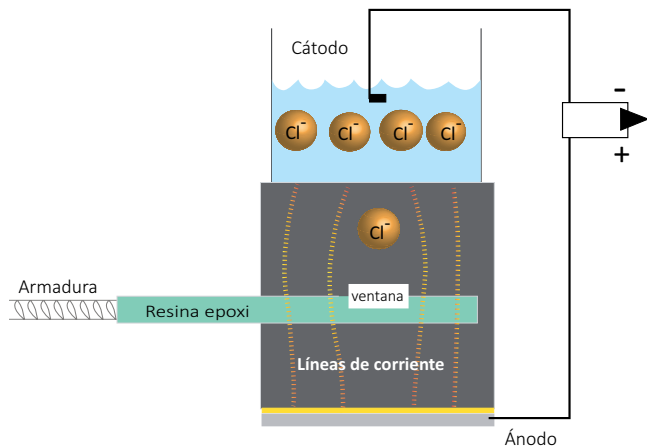


Figura 1. Esquema del ensayo integral con la modificación propuesta

necesaria para provocar la corrosión de la armadura [30]. Durante el ensayo se mide el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión para determinar el momento en el que se inicia la corrosión [2, 31]. Una vez que se ha iniciado la corrosión se desconecta el campo eléctrico, se rompe la probeta y se mide la cantidad de Cl^- en el entorno de la armadura.

Muestras

Se han estudiado 5 tipos de armaduras de 12 mm de diámetro cuya composición se muestra en la tabla 1. De cada calidad de acero inoxidable se han fabricado 6 muestras de mortero de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$, empleando un cemento tipo I, con una relación agua/cemento de 0.5.

Modificación del método de ensayo para adecuarlo a las armaduras de acero inoxidable

En este método de ensayo acelerado, la armadura se encuentra dentro de un campo eléctrico que produce su polarización. Este efecto es despreciable para el caso de las armaduras de acero al carbono, las cuales no tienen capacidad de repasivación [32]. Sin embargo, el comportamiento del acero inoxidable es muy sensible

a dicho campo eléctrico que puede llevar a un inicio de la corrosión no “real”. Para evitar esta polarización se ha recubierto la armadura con resina epoxi excepto una ventana de dimensiones aproximadas de 2 cm^2 en la cara expuesta a la entrada de Cl^- . En el trabajo realizado en el marco del proyecto entre IETcc-CSIC-ACERINOX se muestra como las líneas de corriente no atraviesan la armadura al aplicar este recubrimiento y se ha verificado experimentalmente [28]. En la figura 1 se muestra un esquema del ensayo.

Siguiendo el procedimiento de ensayo propuesto en la norma UNE 83992-2, el campo eléctrico externo se conecta durante unas horas, se desconecta y se deja la muestra aproximadamente 1 hora antes de realizar las medidas de potencial de corrosión (E_{corr}) y velocidad de corrosión (I_{corr}). La velocidad de corrosión se mide aplicando una polarización lineal (LRP) entorno al potencial de corrosión [33-35].

Otras de las modificaciones introducidas en la metodología de ensayo es fijar como límite de despasivación el momento

en el que la velocidad de corrosión es superior a $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. De esta forma, el campo externo se aplica hasta ese momento, y si durante 10 días posteriores se mantiene en valores superiores a este límite se da por concluido el ensayo. En caso contrario, si la velocidad de corrosión disminuye a valores inferiores a dicho umbral, se vuelve a conectar el campo eléctrico hasta volver a la situación anterior.

Una vez alcanzada una velocidad de corrosión estable, se desmonta el ensayo electroquímico y se rompe la probeta por un plano perpendicular a la cara que contiene la piscina y que pasa por la barra. Se extrae muestra del hormigón cercano a la armadura y se analiza su contenido de cloruros de acuerdo con la norma UNE 80213. Adicionalmente, se analiza la superficie de la armadura y se estudia el tipo de corrosión que se ha producido.

3. Resultados obtenidos

En la figura 2 se muestran el tiempo que se ha aplicado el campo externo hasta alcanzar la despasivación de la armadura. Se observa que, de forma cualitativa, el tiempo promedio de ensayo aumenta de acuerdo con el siguiente orden para las calidades de acero: 2001 (92 h) < 304-L (117 h) < 2304 (481 h) < 316-L (608 h) < 2205 (1909 h).

En la Figura 3 se muestran los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) después del ensayo de penetración de cloruros y la concentración de Cl^- (como % respecto al peso de cemento) a la altura de la armadura. Tomando como límite de despasivación el valor de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, se puede observar que, de forma cualitativa, el 2001 y el 304-L superan este umbral para concentraciones de Cl^- próximas a 1% CEM, mientras que en el otro extremo, el 2205 supera este umbral para concentraciones superiores al 4% CEM.

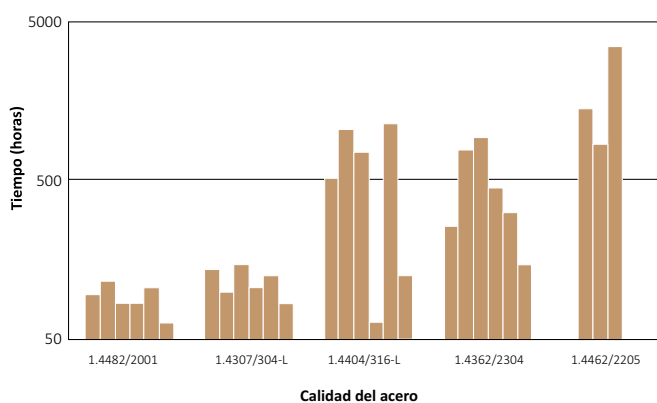


Figura 2. Tiempo de despasivación para las distintas calidades de acero inoxidable

4. Discusión de resultados

Para determinar la vida útil de estas armaduras de acero inoxidable, es necesario determinar cuál es la concentración crítica de cloruros que produce la despasivación de las mismas. Un indicador de la resistencia frente a la corrosión de un acero es el índice PREn, que viene definido por la siguiente fórmula:

$$PREn = \%Cr + 3.3\%wMo + 30\%wN - \%wMn$$

Eq.1

Como se ha comentado en los resultados (Figura 3), en algunos casos no se ha llegado a producir la despasivación de la armadura, como es el caso de algunas probetas con el dúplex EN 1.4462/2205. Teniendo en cuenta únicamente los casos en los que se han alcanzado valores de velocidad de corrosión superiores a $0.2 \mu A/cm^2$, en la Figura 4 se ha representado la concentración de cloruros frente al valor del PREn. Existe una correlación lineal entre ambos parámetros ($R^2=0.92$). Dada la dispersión de los resultados inherente al tipo de ensayo, es posible calcular la concentración crítica de cloruros considerando o asumiendo un riesgo del 10% usado normalmente en la normativa. Este resultado permite asumir que con una probabilidad del 90% cualquier valor obtenido estará por

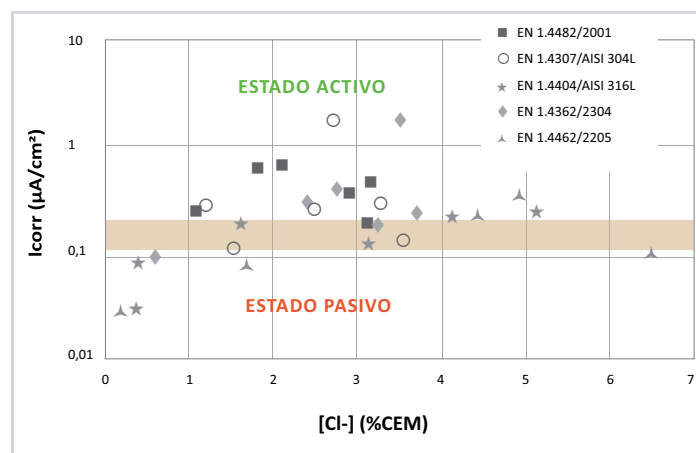


Figura 3. Resultados Icorr y concentración de Cl⁻ para cada una de las calidades de acero estudiadas.

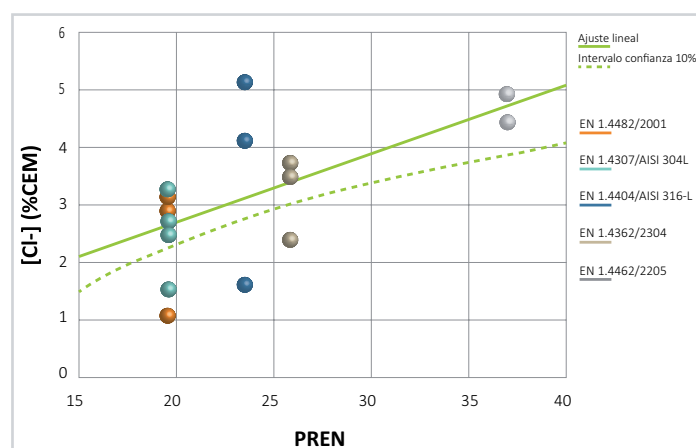


Figura 4. concentración de Cl⁻ frente al valor PREn.

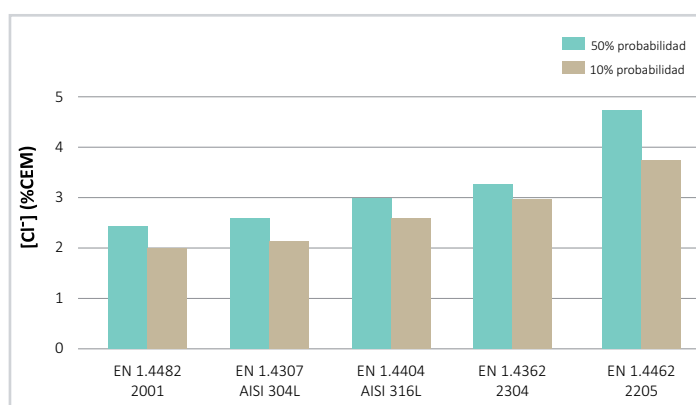


Figura 5. Concentración crítica de Cl⁻ para cada una de las calidades de acero estudiadas.

encima de la curva “intervalo de confianza del 10%”.

En la Figura 5 se muestran los resultados de las concentraciones críticas obtenidas por este método para las probabilidades del 50% y del 10%.

Caso práctico. Aplicación para el cálculo del periodo de iniciación de la corrosión en una estructura de hormigón armado.

A continuación se plantea el cálculo del tiempo de iniciación de la corrosión de las armaduras de una estructura que se encuentre en un ambiente marino IIIb según EHE-08, que es el ambiente que presenta la mayor concentración en superficie de cloruros. Considerando que el transporte de cloruros es puramente difusivo se resuelve la 2ª ley de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = D \nabla^2 C$$

Eq.2

Donde C es la concentración, t es el tiempo y D es el coeficiente de difusión. A su vez, como se expresa en el Anejo 9 de la EHE-08, se puede considerar que el coeficiente de difusión varía con el tiempo siguiendo la ecuación:

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

Eq.3

Donde D(t) es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t, D(t₀) es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t₀, y n es el factor de edad. En los cálculos que se han realizado, se considera que este factor de edad se aplica durante los dos primeros años, considerando que después de este tiempo el hormigón no sigue “envejeciendo” o disminuyendo el coeficiente de difusión.

Los cálculos se han realizado con un programa de elementos finitos comercial teniendo en cuenta los parámetros de entrada al modelo que se muestran en la Tabla 2. La concentración superficial de cloruros elegida es la propuesta por la EHE-08 para un ambiente marino IIIb. Se han realizado los cálculos para dos hormigones con dos coeficientes de difusión diferentes (tabla A.9.4, Anejo 9, EHE-08) y se han obtenido la evolución de la concentración de cloruros considerando recubrimientos que varían entre 20 y 50 mm.

En la Figura 6 se muestra la evolución de la concentración de cloruros para los diferentes recubrimientos junto con la concentración crítica de cloruros para diferentes aceros considerando un hormigón con un coeficiente de difusión de $5.6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. En el caso que se ha calculado si se emplea acero al carbono, cuya concentración crítica se ha establecido en 0.6% CEM, se produciría la despasivación del mismo en 20 años para el mayor de los recubrimientos considerados, 50 mm. En el caso del acero dúplex 2001 o el austenítico 304-L sería suficiente un recubrimiento de 40 mm para conseguir un periodo de iniciación superior a 100 años. El resto de tipos de acero inoxidable (316-L, 2304 y 2205) podrían alcanzar el periodo de iniciación de 100 años con un mínimo recubrimiento. Hay que tener presente que en este ejercicio se está considerando que no hay otros tipos de degradación.

$C_s(\% \text{cem})$	$C_o(\% \text{cem})$	$r(\text{mm})$	$D(\text{m}^2/\text{s})$	n
3.2	0	20-50	$5.6 \cdot 10^{-12}$ - $1.4 \cdot 10^{-12}$	0.5

Tabla 2. Parámetros de entrada al modelo: concentración superficial de cloruros (C_s), concentración inicial de cloruros (C_o), recubrimiento (r), coeficiente de difusión (D) y factor edad (n).

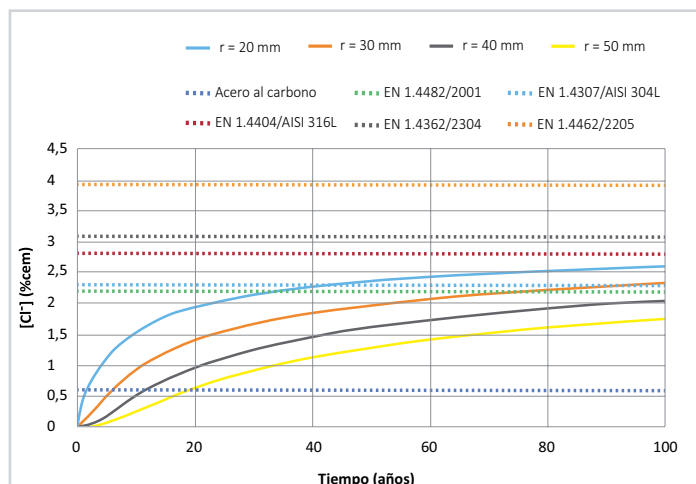


Figura 6. Evolución de la concentración de Cl^- para diferentes recubrimientos y un coeficiente de difusión de $5.6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Concentración crítica de diferentes aceros.

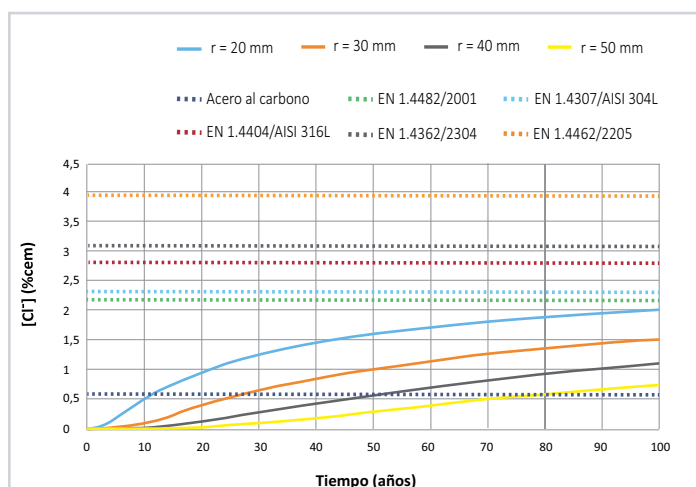


Figura 7. Evolución de la concentración de Cl^- para diferentes recubrimientos y un coeficiente de difusión de $1.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Concentración crítica de diferentes aceros.

En la Figura 7 se ha repetido el ejercicio anterior para el caso de un hormigón que presente un coeficiente de difusión menor, $1.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Si se emplease un acero al carbono sería necesario garantizar recubrimientos superiores a 50 mm en toda la estructura para que el tiempo de iniciación de la corrosión fuese de 100 años. Sin embargo, no se alcanzaría la despasivación en 100 años

si se emplease un acero inoxidable, aun empleándose un recubrimiento mínimo de 20 mm.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen de este estudio son:

- Partiendo de la norma UNE-EN 83992-2 se propone una modificación de la misma para obtener una metodología que permita calcular el valor crítico de cloruros para el caso de aceros inoxidables. Este estudio sería necesario completarlo con más ensayos que permitiera reducir la incertidumbre por la alta dispersión de los resultados.
- Se ha obtenido una buena relación entre la concentración crítica de cloruros y el valor del PREn, lo cual permitiría estimar la concentración crítica de cloruros para otros tipos no estudiados.
- Se muestra un ejercicio de aplicación de armaduras de acero inoxidable en un ambiente marino IIIb según EHE-08. Manteniendo un recubrimiento mínimo permitiría alcanzar durabilidades superiores a 100 años.

FUENTE / SOURCE:

J. Sánchez^a, N. Rebolledo^a, J. Torres^a, V. Matres^b

^aGrupo de corrosión de las Armaduras y Seguridad Estructural, IETcc-CISC, Madrid

^bAcerinox Europa, S.A.U. (Cádiz)

↓ [referencias solo on-line](#)