

Valores de resistividad para clases de resistencia a los cloruros.

C. Andrade^{1*} 

*Autor de Contacto: candrade@cimne.upc.edu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.976>

Recibido: 15/10/2025 | Correcciones recibidas: 21/11/2025 | Aceptado: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

RESUMEN

La resistividad eléctrica del hormigón representa su porosidad y tortuosidad. Desde hace años se ha propuesto el uso este parámetro debido a su facilidad de medida (no destructiva) en la misma probeta que se usa para el ensayo de resistencia a la compresión y tanto como Indicador de corrosión como por su equivalencia con el coeficiente de difusión de los cloruros. En la última versión del Eurocódigo 2 (EC2)-hormigón se han introducido las “Clases de Resistencia al ambiente” (Exposure Resistance classes, ERC en sus siglas en inglés) que permiten clasificar a los hormigones por su coeficiente de difusión en ensayo normalizado o por su resistencia a la carbonatación. En el presente trabajo se ha aplicado una equivalencia entre la resistividad y el coeficiente de difusión aparente de los cloruros simplificada para obtener la tabla de ERC's basada en la resistividad. Para el cálculo de los recubrimientos también se ha simplificado el modelo que necesita solo como parámetros de entrada la resistividad, el exponente de edad y el factor de exposición.

Palabras clave: hormigón; vida-en-servicio; corrosión; resistividad; clases de resistencia al ambiente.

Citar como: Andrade, C. (2026), “Valores de resistividad para clases de resistencia a cloruros.”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 99 – 110, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.976>

¹Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Madrid. España.

Contribución de cada autor

En este trabajo, la autora Carmen Andrade, participó en todos los aspectos del desarrollo de este artículo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2026.

Concrete resistivity values for chloride resistance classes.

ABSTRACT

The electrical resistivity of concrete represents its porosity and tortuosity. For years, the use of this parameter has been proposed due to its ease of measurement (non-destructive) on the same specimen used for compressive strength testing and both as a corrosion indicator and because of its equivalence to the chloride diffusion coefficient. The latest version of Eurocode 2 (EC2) for concrete introduced the Exposure Resistance Classes (ERCs) concept, which allows concrete to be classified by its diffusion coefficient in a standardized test or by its resistance to carbonation. In this work, a simplified equivalence between resistivity and the apparent chloride diffusion coefficient has been applied to obtain the ERC's table based on resistivity. The model for calculating cover requirements has also been simplified, requiring only the resistivity, aging exponent and exposure factor.

Keywords: concrete; service-life; corrosion; resistivity; exposure resistance classes.

Valores de resistividade do concreto para as classes de resistência ao cloreto.

RESUMO

A resistividade elétrica do concreto representa, indiretamente, sua porosidade e tortuosidade dos poros. Há anos, o uso desse parâmetro tem sido proposto devido à facilidade de sua medição (não destrutiva) no mesmo corpo de prova utilizado para o ensaio de resistência à compressão, tanto como indicador de corrosão quanto por sua equivalência ao coeficiente de difusão de cloretos. A versão mais recente do Eurocódigo 2 (EC2) para concreto introduziu as Classes de Resistência à Exposição (ERCs), que permitem classificar o concreto pelo seu coeficiente de difusão em um ensaio padronizado ou pela sua resistência à carbonatação. Neste trabalho, uma equivalência simplificada entre resistividade e o coeficiente de difusão aparente de cloretos foi aplicada para obter a tabela de ERCs baseada na resistividade. O modelo para o cálculo dos requisitos de cobrimento também foi simplificado, exigindo apenas resistividade, expoente de idade e fator de exposição como parâmetros de entrada.

Palavras-chave: concreto, vida útil, corrosão, resistividade, classes de resistência ao ambiente.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alcompat.int@gmail.com, Página Web: www.alcompat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de la armadura es el proceso que desencadena el mayor número de deterioros en el hormigón estructural. Para evitar deterioros prematuros por corrosión, los códigos establecen en función del tipo de ambiente: a) unos espesores de recubrimiento mínimos, b) unos requisitos en la proporción de los componentes de la mezcla de hormigón o fijan una resistencia a compresión mínima, c) prohíben el uso de cloruros en el amasado y d) limitan el ancho de fisura. A estos requisitos, se suma en los últimos años el creciente interés en ajustar las dosificaciones acudiendo a ensayos de comportamiento/desempeño (de resistencia a los cloruros y a la carbonatación) para luego aplicar modelos de cálculo del tiempo hasta corrosión de la armadura.

Estos modelos de predicción del avance de los cloruros o la carbonatación se propusieron hace ya muchos años, entre ellos se destacan los ya bien conocidos entre los investigadores (Tuutti 1982, Andrade 1989, 2014; Sagües 2003; Izquierdo 2001). Estos modelos necesitan como parámetros de entrada resultados de ensayos que han sido de lenta normalización (ASTM C1556; EN 12390-11) y que han dado lugar a lo que se ha llamado “Indicadores de durabilidad” (Baroguel- Bouy 2002, Andrade 2006) que para cada vida en servicio fijan ciertos valores límite para cada recubrimiento. Debido a la dificultad y costo de estos ensayos, desde la década de los años 1990, se propusieron también modelos basados en la resistividad eléctrica que es un método no destructivo (Andrade 1993, 2004) y por ello, mucho más práctico y accesible a los laboratorios.

La incorporación efectiva de modelos o Indicadores en las normas sigue siendo muy lenta, aunque ya se incorporaron modelos a los Anejos del Código del Hormigón Estructural en el año 2008 (EHE 2008). En la actualidad los recubrimientos de la nueva versión del Eurocódigo 2(EC-2) (EN 1992-1-1) de hormigón estructural se han calibrado con modelos (Andrade& Izquierdo 2023) pero sin que estos se hayan incluido en la norma. Es decir, los modelos de cálculo se han considerado de forma “implícita”. El no sugerir un modelo concreto es debido a que existe a nivel internacional mucha prudencia sobre la precisión e incertidumbre de las predicciones, debido a la falta de su calibración a largo plazo.

Un paso en la incorporación a la normativa de los Indicadores y modelos de vida en servicio se está dando en el seno del comité CEN TC-104-hormigón (EC2) con la propuesta del concepto de “Resistencia al ambiente (Exposure Resistanse clases-ERC)”, que permitirán una clasificación según los resultados de los ensayos de comportamiento/desempeño. En el presente trabajo se explica someramente este concepto y se ilustra tanto el modelo basado en la resistividad y su simplificación, como los valores de resistividad que son coherentes con los niveles de ERC’s que se han propuesto para la resistencia a los cloruros.

2. PROCEDIMIENTO

Se describe primero el concepto de ERC según ha sido aprobado en el comité sobre durabilidad del EC2 (CEN-TC250/SC2/WG1/TG110). Luego se mencionan los métodos de ensayo para determinar los valores de resistencia a los cloruros y la norma de resistividad, para finalizar explicando cómo se ha deducido la resistividad desde los valores del coeficiente de difusión en base a los modelos utilizados.

2.1 Concepto de ERC

En la normativa europea, los procesos posibles de deterioro se clasifican en base a las Clases de Exposición, que para el caso de la corrosión de la armadura son denominadas XC para carbonatación, XS para ambientes con cloruros marinos y XD para cloruros de otras procedencias, como las sales de deshielo. Las clases de exposición del EC2-2024 se mantienen las mismas prácticamente que las que existían en la norma del hormigón como material (EN 206). Las ERC se proponen para definir hormigones resistentes a cada una de esas clases de exposición. El concepto

solo se ha desarrollado para la corrosión de la armadura, pero está pensado para aplicarlo también a los otros tipos de ataque.

Los símbolos acordados para las ERC's fueron XRC para resistencia a la carbonatación y XRDS para la resistencia a los cloruros, sean marinos o de sales de deshielo. Cabe destacar que no se debe confundir la XRC (Resistencia a la Exposición a la Carbonatación) con la XC (Exposición a la Carbonatación), ya que esta última clasifica la agresividad del entorno, mientras que la XRC representa el nivel de resistencia a dicha XC.

También es importante señalar que el estado límite “de corrosión” que se aceptó para las ERC's no es el de despasivación de la armadura, pues es casi imposible detectarlo con precisión, sino que se aceptó que dentro de la vida útil se incorpore un cierto periodo de propagación. Este periodo de forma convencional se fijó en una profundidad de corrosión de 50 µm en el caso de corrosión por carbonatación y de 500 µm de profundidad de picadura para el caso de cloruros. Por tanto, la vida útil se compone de un periodo de iniciación y de un periodo de propagación tal y como Tuutti (Tuutti 1982) reflejó en su diagrama.

Para asegurar una transición suave del presente sistema basado es especificar la composición del hormigón, al uso de las ERC, se decidió un periodo de transición donde ambos sistemas pueden coexistir. Por ello, los ensayos de carbonatación o cloruros no son obligatorios para todas las mezclas, sino que las ERC también pueden cumplirse a través de la composición del hormigón. Lo novedoso es la fijación de los límites en este sistema de ERC.

2.1.1. Recubrimientos de EC2

Los valores de los recubrimientos para cada ERC's para el caso del ataque por cloruros se presentan en la tabla 1. Estos valores pueden ser ajustados por cada país según su experiencia.

Tabla 9 Recubrimientos mínimos $c_{min,dur}$ para clases de exposición a cloruros
(EN 1992-1-1:2023).

ERC	Clases de exposición (cloruros)											
	XS1		XS2		XS3		XD1		XD2		XD3	
	Vida en servicio de proyecto (años)						Vida en servicio de proyecto (años)					
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRDS 0,5	20	20	20	30	30	40	20	20	20	30	30	40
XRDS 1	20	25	25	35	35	45	20	25	25	35	35	45
XRDS 1,5	25	30	30	40	40	50	25	30	30	40	40	50
XRDS 2	25	30	35	45	45	55	25	30	35	45	45	55
XRDS 3	30	35	40	50	55	65	30	35	40	50	55	65
XRDS 4	30	40	50	60	60	80	30	40	50	60	60	80
XRDS 5	35	45	60	70	70	—	35	45	60	70	70	—
XRDS 6	40	50	65	80	—	—	40	50	65	80	—	—
XRDS 8	45	55	75	—	—	—	45	55	75	—	—	—
XRDS 10	50	65	80	—	—	—	50	65	80	—	—	—

NOTA 1: Las clases XRC para resistencia a la corrosión inducida por carbonatación se derivan de la profundidad de carbonatación [mm] (valor característico 90 % fractil) que se asume se obtiene tras 50 años bajo condiciones de referencia (400 ppm de CO₂ en un entorno constante del 65 % de humedad relativa y a 20 °C). El valor de designación XRC tiene la dimensión de una tasa de carbonatación [mm/ $\sqrt{años}$].

NOTA 2: Los valores mínimos recomendados de recubrimientos de hormigón $c_{min,dur}$ suponen ejecución y curado según la EN 13670 con al menos clase de ejecución 2 y clase de curado 2.

NOTA 3: Los recubrimientos mínimos pueden aumentarse con un elemento adicional de seguridad Δc_{dur} y teniendo en cuenta requisitos especiales (por ejemplo, condiciones ambientales más extremas).

2.2 Normas de ensayo a utilizar

Para determinar si un hormigón es de una ERC o de otra, es necesario someterlos a ensayos de desempeño. Las normas europeas en condiciones naturales (que reflejan las condiciones del ensayo de un ambiente XS2 o XD2 con humedad constante) y de ensayo acelerado para el caso de los cloruros son:

- La norma de difusión de cloruros de referencia es la de difusión natural durante 90 días a partir de un curado húmedo de 28 días en contacto con una solución al 3% en masa de NaCl. (*EN12390-11- Testing hardened concrete — Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*)
- Como alternativa acelerada se puede usar la norma de migración EN12390-18- *Testing hardened concrete – Part 18: Determination of the chloride migration coefficient*),

2.2.1 Resistividad

La norma de resistividad que se puede utilizar es la EN12390-19- *Testing hardened concrete – Part 19- Determination of electrical Resistivity*, que utiliza siempre el método de las 4 puntas y que es similar a la Recomendación de Alconpat,

2.3 Modelos para calcular los recubrimientos

En el comité del EC2 se utilizaron diversos modelos para el cálculo, entre ellos los del Código Modelo del fib (MC2020) (Andrade& Izquierdo 2023) que son los que se usarán en el presente trabajo. Obtenidas las profundidades del frente agresivo, los recubrimientos se ajustaron de forma consensuada y racional, pues la progresión entre clases de ERC debe ser de 5 y 10 mm y no con fracciones menores.

2.3.1 Modelo de la resistividad

En la presente comunicación no se detallan los modelos clásicos de carbonatación ni de cloruros, que son los propuestos en el MC2020 con unos u otros parámetros de entrada, pero si se describe el modelo de la resistividad por su novedad.

La resistividad puede ser utilizada a modo de Indicador de durabilidad, al igual que el coeficiente de difusión de los cloruros o que la velocidad de carbonatación, y en otro nivel, es necesario situar el uso de un modelo de vida en servicio. El modelo completo basado en la resistividad se formula para el periodo de iniciación y de propagación según se expresa en la ecuación (1) (Andrade 2004).

$$- \quad t_L = \frac{c^2 \cdot \rho_{ef,0} \cdot S_w^{-\tau} \cdot \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q}{F_{xc}} \cdot r + \frac{P_{lim} \cdot \rho_{ef,t} \cdot \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \cdot S_w^\tau}{K_{corr}} \quad (1)$$

Donde

- c es el espesor de recubrimiento mínimo, en cm.
- $\rho_{ef,0}$ es la resistividad efectiva a los 28 días de curado, en $\Omega \cdot \text{cm}$.
- q es factor de edad, (-). Este factor es 0,8 veces el valor del coeficiente de difusión (Andrade et al 2011).
- t_0 es la primera edad de 28 días en la que se toma el valor de la resistividad.
- t_n es la última edad que se mide. Ambas edades t_0 y t_n deben introducirse en las mismas unidades.
- F_{xc} es el factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación, en $\text{cm}^3 \cdot \Omega / \text{año}$.
- P_{lim} es la penetración de corrosión considerada como límite. Para una fisuración de 0,1 mm de ancho de fisura en la superficie del hormigón se toma un valor de pérdida del diámetro

de la barra de 0,01 cm.

- S_w^τ que es el grado de saturación del hormigón que depende de la tortuosidad τ , que a efectos medios puede tomarse como con un valor de 2. Este factor depende de la climatología, de si el hormigón está expuesto directamente a la acción de la lluvia y de la porosidad/calidad del material.
- K_{corr} es el factor de proporcionalidad entre velocidad de corrosión y la inversa de la resistividad, $30,16 \Omega \cdot \text{cm}^2/\text{año}$.

En el caso de los cloruros la aplicación de este modelo supone calcular los tres factores del periodo de iniciación: a) de reacción o combinación, r, b) Ambiental, F_{xc} , y c) de evolución con la edad, q. Para el periodo de propagación los factores aplican también: el de edad, q, mientras que la fracción el grado de saturación S_w , que depende de la tortuosidad τ que se puede tomar con un valor de 2 como media, es necesario tenerlo en cuenta en los dos periodos de iniciación y de propagación o en su lugar introducir un valor medio de la resistividad en cada clase de exposición.

En la figura 1 se presenta un esquema del aumento de la resistividad con el tiempo y con los ciclos estacionales de variación de la humedad del ambiente. En la figura se muestra una clase de exposición sumergida (hormigón saturado) y otra en la atmosfera, donde la resistividad va a aumentar porque el grado de saturación S_w , será menor.

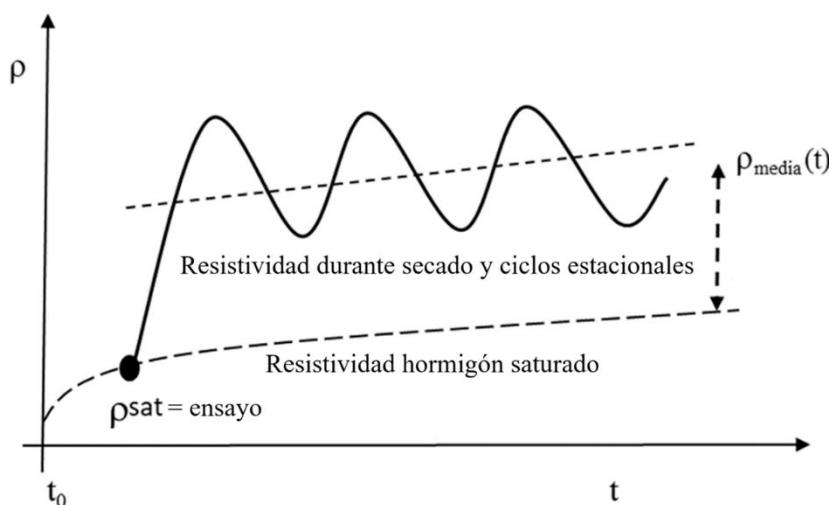


Figura 1 Evolución esquemática de la resistividad con el tiempo en función de la humedad del ambiente.

En la tabla 2 se presentan los valores del factor ambiental F_{xc} para los cloruros en función de las clases de exposición del EC2, considerando el uso del coeficiente de difusión aparente. El factor de reacción, r, se puede englobar en este factor ambiental, como se explicará más adelante, al igual que se explicará que el factor q de edad se puede suponer en función del tipo de cemento (tablas 3 y 4), o bien se puede determinar experimentalmente registrando la evolución con el tiempo (figura 1).

Tabla 2. Factores ambientales F_{xc} .

Clase de Exposición	XDS1	XDS2	XDS3
$F_{exp} (\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{año})$	10000	17000	25000

2.4 Modelo simplificado basado en la resistividad

Es posible simplificar la ecuación (1) para el periodo de propagación en el caso de los cloruros, en lugar de calcularlos se puede adoptar, por ejemplo, para las exposiciones XS2 o XD2 siempre saturado, un periodo de propagación de 5 años lo que dejaría el $t_i = 45$ años para una vida en servicio

de 50 años.

En cuanto al periodo de iniciación, en la ecuación (2) se puede englobar el efecto de la reacción de los cloruros con las fases del cemento (factor de reacción, r) en el valor del coeficiente ambiental. El efecto de la reacción de cloruro sobre el factor ambiental, que es de $F_{xc}=1E-4 \Omega\text{cm}^3/\text{sg}$, se puede obtener del ensayo de difusión natural (o de migración) al multiplicar (ecuación (2)) la resistividad medida en la misma probeta por el D_{ap} :

$$F_{xc} = \rho_{ef} \cdot D_{ap} \quad (2)$$

Para el cálculo de la profundidad del frente crítico de cloruros o del espesor de recubrimiento, una vez asumida esta equivalencia de la ecuación (2) es posible aplicar la ley de la raíz cuadrada del tiempo que es la que se subyace en cualquier proceso de difusión (como ya se hizo para desarrollar la ecuación (1)). Así resulta la ecuación (3):

$$x_{cl} = 2 \cdot \sqrt{D_{ap,t} \cdot t} = 2 \cdot \sqrt{\frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{\rho_{ef,t}} \cdot t} \quad (3)$$

El valor del $F_{xc}=7,5 \times 10^{-4}$ es aplicable para los ensayos de difusión natural. En el caso de ensayos acelerados de migración, dado que el ensayo es de corta duración y prácticamente no se combinan cloruros, el valor que debe emplearse de $F_{xc}=13 \times 10^{-4}$.

Para el cálculo del factor de edad basta con seguir la evolución de la resistividad con el tiempo (idealmente entre 28 y al menos 90 días más los 90 días que dura el ensayo) y del ajuste a la evolución se obtiene el exponente de edad q . La fórmula a aplicar es la expresada en la ecuación (3).

$$\rho_{ef,t} = \rho_{ef,0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^q \quad (4)$$

Esta formulación simplificada que solo necesita el calibrado de la resistividad con el coeficiente de difusión aparente (con reacción de los cloruros con las fases del cemento) y el seguimiento del valor de la resistividad hasta una edad predeterminada, resulta de muy inmediata aplicación práctica por lo que se ha aplicado a los valores del coeficiente de difusión obtenidos de modelos probabilistas, como se explica a continuación.

3. RESULTADOS

La denominación de las clases de ER finalmente acordadas para el caso de los cloruros se muestra en la primera columna de las Tablas 6 (EN 1992-1-1-2023). Se han identificado 10 niveles de ERC que pueden combinarse o incluso dividirse en más según lo decidan los organismos nacionales de normalización, basándose en su experiencia local.

En las siguientes columnas de la Tabla 3 se expresan unos valores del coeficiente de difusión que clasifican los niveles de ERC. Estos valores no están todavía acordados y los que se muestran son los propuestos por la autora del presente trabajo en base a:

- Considerar los valores de la denominación de ERC como valores medios del coeficiente de difusión. Por tanto, los valores característicos vendrían determinados por el coeficiente de variación (CV) obtenido en el ensayo, sugiriendo no aceptar una amasada si el CV>30%.
- Como el coeficiente D_{ap} disminuye con el tiempo (evolución con la edad, factor α), se especifican también los valores del coeficiente que se obtiene a partir de la ecuación (4) para $\alpha=0,3-0,4-0,5-0,6$.
- Los valores del recubrimiento acordes con la definición indicada en la Nota 1 de la Tabla

1, se han obtenido a través de cálculos probabilistas con el modelo de cloruros del MC2020 del *fib* para que supongan una probabilidad de corrosión del 7-10%.

Tabla 3. Valores medios del coeficiente de difusión* D_{ap} en [cm²/s] para las clases XRDS basados en ensayos de difusión natural (EN 12390-11) para los ambientes con cloruros.

Valor medio del coeficiente de difusión aparente para varios exponentes de edad (50 años vida en servicio y $t_0 = 28$ días) $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^*$					
Valor de α durante 50 años	$\alpha \geq 0,0$	$\alpha \geq 0,3$	$\alpha \geq 0,4$	$\alpha \geq 0,5$	$\alpha \geq 0,6$
Tipo de cemento-norma europea*	CEM I bajo en aluminatos	CEM I alto en aluminatos	CEM II (<20% adición)	CEM IV (< 40% adición)	CEM III (35- 80% escorias)
XRDS0,5	0,05	0,35	0,7	1,3	2,5
XRDS 1	0,1	0,7	1,4	2,6	4,9
XRDS1,5	0,15	1,05	2	3,9	7,3
XRDS 2	0,2	1,4	2,7	5,1	9,8
XRDS 3	0,3	2,1	4	7,7	14,6
XRDS 4	0,4	2,8	5,3	10,2	19,5
XRDS 5	0,5	3,5	6,7	12,8	24,4
XRDS 6	0,6	4,2	8	15,3	29,3
XRDS 8	0,8	5,6	10,7	20,4	39
XRDS 10	1	7	13,4	25,5	48,8

*Sugerencia de la autora. No aprobados a nivel europeo.

Aplicando la ecuación (3) a estos valores y utilizando un valor del $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$ se obtienen los valores de la resistividad equivalente de la tabla 4.

Tabla 4. Valores medios de resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$) para los ambientes con cloruros a 28 días según la EN 12390-19 (En el caso de la resistividad el CV es del orden del 15%)

Valores medios de Resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$) para varios exponentes de edad utilizando un valor del $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$ (50 años vida en servicio y $t_0 = 28$ días)					
Valor de α durante 50 años	$\alpha \geq 0,0$	$\alpha \geq 0,3$	$\alpha \geq 0,4$	$\alpha \geq 0,5$	$\alpha \geq 0,6$
Tipo de cemento-norma europea*	CEM I bajo en aluminatos	CEM I alto en aluminatos	CEM II (<20% adición)	CEM IV (< 40% adición)	CEM III (35- 80% escorias)
XRDS0,5	15000	2150	1071	577	300
XRDS 1	7500	1070	535	288	155
XRDS1,5	5000	715	375	192	105
XRDS 2	3750	535	280	147	77
XRDS 3	2500	357	188	98	52
XRDS 4	1875	268	140	75	40
XRDS 5	1500	215	112	60	30
XRDS 6	1250	180	94	50	25
XRDS 8	937,5	134	70	37	20
XRDS 10	750	107	56	30	15

*Sugerencia de la autora

Tabla 5. Recubrimientos (mm) según el EC2 y resistividades ($\Omega \cdot m$) equivalentes a los coeficientes de difusión aparente deducidos de la ERC's para un $\alpha=0,3$ y los factores ambientales F_{xc} de la tabla 2.

ERC $D_{ap} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ $\rho (\Omega \cdot \text{m})$	Clases de exposición (cloruros para $\alpha=0,3$) c (mm); Resistividad (($\Omega \cdot \text{m}$))					
	XS1/XD1		XS2/XD2		XS3/XD3	
	50	100	50	100	50	100
Vida en servicio de proyecto (años)						
XRDS 0,5	20	20	20	30	30	40
$D_{ap}=0,35 \rightarrow \rho$	914		1550		2260	
XRDS 1	20	25	25	35	35	45
$D_{ap}=0,7 \rightarrow \rho$	460		780		1130	
XRDS 1,5	25	30	30	40	40	50
$D_{ap}=1,05 \rightarrow \rho$	305		515		760	
XRDS 2	25	30	35	45	45	55
$D_{ap}=1,4 \rightarrow \rho$	230		390		570	
XRDS 3	30	35	40	50	55	65
$D_{ap}=2,1 \rightarrow \rho$	155		260		380	
XRDS 4	30	40	50	60	60	80
$D_{ap}=2,8 \rightarrow \rho$	115		195		290	
XRDS 5	35	45	60	70	70	—
$D_{ap}=3,5 \rightarrow \rho$	95		155		230	
XRDS 6	40	50	65	80	—	—
$D_{ap}=4,2 \rightarrow \rho$	80		130		190	
XRDS 8	45	55	75	—	—	—
$D_{ap}=5,6 \rightarrow \rho$	60		97		145	
XRDS 10	50	65	80	—	—	—
$D_{ap}=7 \rightarrow \rho$	50		80		115	

A modo de ejemplo también en la tabla 5 se han calculado las resistividades equivalentes a los coeficientes de difusión aparente de la Tabla 3, pero usando los factores ambientales de la Tabla 2, en lugar de usar un valor de $F_{xc}= 7,5 \times 10^{-4}$. El ejemplo se ha realizado para un factor de edad $\alpha=0,3$. En esta tabla, para más facilidad, se han añadido los valores de resistividad mínimos debajo de los valores de los recubrimientos del Eurocódigo 2, utilizando para la equivalencia los factores ambientales de la Tabla 2.

4. DISCUSION

Es ya admitido que los modelos de predicción del tiempo hasta corrosión no están calibrados a largo plazo, por lo que su precisión o incertidumbre permanecerá desconocida hasta que se tenga una experiencia suficientemente larga, que permita comparar los ensayos a corto plazo con los resultados a 50 o 100 años. Una fuente adicional de incertidumbre lo constituye el ambiente, ya que, aunque los valores se agrupan en clases de exposición XC's, localmente para el mismo

ambiente pueden presentarse muchas variaciones de humedad y temperatura. Siendo conscientes de esta incertidumbre en la predicción, sin embargo, se alcanzó un consenso total en el Comité CEN-TC250/SC2/WG1/TG10 que utilizó cinco modelos de cloruros diferentes, con diferentes parámetros de entrada. Los recubrimientos de la tabla 1 se obtuvieron aplicando a los resultados de esos modelos de penetración de los cloruros, en bruto, un redondeo para que los saltos entre ERC's fueran de 5 o 10 mm y no con fracciones. Por lo tanto, los espesores de recubrimiento propuestos en la Tabla 3 no son solo el resultado de un cálculo matemático exacto, sino que se aplicó un redondeo y la opinión de expertos a los valores calculados. Además, estos recubrimientos corresponden a la profundidad mínima que proporciona el valor nominal, a la que hay que sumar el margen de tolerancia de 5 ó 10 mm. Por ello, cualquier intento de reproducir los valores de la tabla 1 puede llevar a discrepancias. En todo caso, estos recubrimientos son muy parecidos a los que existían en la versión anterior del Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1:2023) y pueden ser adaptados por cada país según su experiencia local.

A modo de ejemplo,

En el caso de la resistividad, una vez calibrada con unos primeros ensayos de difusión natural de cloruros y utilizando la expresión (2), determinada para cada tipo de hormigón, la ventaja práctica de ser un método barato y de carácter no destructivo, permite extender el control de calidad a una población de muestras mucho mayor. Esta fue la metodología que se aplicó en el caso de la construcción de las terceras exclusas del Canal de Panamá (Andrade et al. 2016) y que ahorro la realización de innumerables ensayos de cloruros.

4.1 Cálculo simplificado de los recubrimientos

Aunque como se ha comentado los recubrimientos se calcularon con modelos que usaban los valores medios del coeficiente de difusión aparente de los cloruros, con diversos CV y suponiendo una probabilidad de fallo del 7-10%, a continuación, se exponen tres casos en los que esos recubrimientos se demuestra que se pueden también deducir de forma aproximada de un cálculo muy simplificado.

Aplicando la ecuación (3) en la tabla 6 se indican los recubrimientos para las clases XRDS1, XRDS3 y XRDS10 que se toman como ejemplo, para la clase de exposición XS2 que es la correspondiente a condiciones de inmersión total (que son las mismas del ensayo de difusión natural). Los recubrimientos tomados como ejemplo son para 50 años y los valores de resistividad o coeficiente de difusión aparente son sin exponente de edad ($\alpha = 0$).

Tabla 6. Recubrimientos para la clase XS2 y 50 años y los obtenidos con el cálculo simplificado de la raíz cuadrada del tiempo y utilizando un valor del $F_{xc} = 17000$ (tabla 2).

Clase ERC	Recubrimiento mínimo (mm) en Tabla 1 para clase XS2 y 50 años con $\alpha = 0$	Valor de la resistividad ($\Omega \cdot m$)	Profundidad (mm) calculada con ecuación (3) y 50 años y con $\alpha = 0$
XRDS1	25	7500	25,1
XRDS3	40	2500	43,5
XRDS10	80	750	79,4

Puede comprobarse que los valores de recubrimiento propuestos en la tabla 1 por el EC2, dado que se suponen para el 7-10% de probabilidad de fallo son razonablemente muy aproximados a los que se pueden calcular de forma simplificada con la ecuación (3). Bien, con el coeficiente de difusión aparente, cómo con la resistividad equivalente. Siempre sobre esos recubrimientos hay que aplicar los 5 ó 10 mm adicionales dado que son valores mínimos, lo que hace que absorbe la discrepancia debido a los necesarios redondeos a múltiplos de 5 o 10. Este cálculo simplificado permite al proyectista una aproximación a su caso concreto, sin necesidad de cálculos probabilistas.

5. CONCLUSIONES

El uso de la resistividad eléctrica como parámetro indicativo de la resistencia a los cloruros es una práctica cada vez más extendida pero que necesita valores de referencia en relación a los recubrimientos y tener en cuenta el aumento de la resistividad en el tiempo.

En el presente trabajo se ha expuesto una simplificación para obtener el factor ambiental, F_{xc} , a partir de un ensayo simultáneo de difusión de cloruros y resistividad, a la vez que el seguimiento del aumento de la resistividad en el tiempo para tomar un factor de edad entre 28 y al menos 90 días. A partir de la equivalencia entre resistividad y coeficiente de difusión aparente (ensayo natural o de migración) se pueden calcular los recubrimientos necesarios de forma simplificada basándose en la ley de la raíz cuadrada del tiempo. Estos cálculos simplificados son una aproximación “ingenieril” que ayudará al proyectista.

Se aportan de esta manera para las ERC's utilizadas en el Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1:2023), los valores límite mínimos de resistividad equivalentes a los coeficientes de difusión aparente,

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado a partir de supuestos previos sin financiación externa, por lo que se quiere agradecer a CIMNE los medios humanos y logísticos puestos a disposición de la autora.

7. REFERENCIAS

- Andrade, C., Alonso, C., Rodríguez, J., (1989) *Remaining service life of corroding structures*, Proceedings IABSE Symposium on Durability, Lisbon, September, pp. 359-363.
- Andrade C. (1993) *Calculation of chloride diffusion-coefficients in concrete from ionic migration measurements*. Cement and Concrete Research Vol. 23 (1993) 724-742.
- Andrade C. 2004, *Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity*. International Symposium on Advances in Concrete through Science and Eng., RILEM Symposium, March 22-24, Evanston (Illinois, USA).
- Andrade C.; *Multilevel methodology for durability design*. International workshop RILEM on Performance based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid-Spain, (2006) 101-108.
- Andrade, C. (2014). *Probabilistic Treatment of the Reinforcement Corrosion*. 2013 W.R. Whitney Award Lecture: Corrosion vol. 70, No. 6.
- Andrade C., Rebolledo N., Tavares F., Pérez R., Baz M. (2016) *Concrete durability of the new Panama Canal: Background and aspects of testing-* Chapter in the book: Marine Concrete Structures. Mark Alexander Editor. Woodhead Publishing in Civil and Structural Engineering.
- Andrade C., Izquierdo D. (2023) *Durability and Cover Depth Provisions in Next Eurocode 2. Background Modelling and Calculations*. Hormigón y Acero 2023; 74(299-300):19-40. <https://doi.org/10.33586/hya.2023.3102>
- ASTM C1556-22, *Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion*.
- Baroghel-Bouny, V. (2002) *Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part II: Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters*. Proceedings of the 3rd International Workshop “Testing and modelling chloride ingress into concrete” Madrid Spain. C. Andrade and J. Kropp editors.
- C. Andrade, M. Castellote, R. D'Andrea (2011) *Measurement of ageing effect of chloride diffusion coefficients in cementitious matrices*- Journal of Nuclear Materials, 412 209-216.
- EN 206:2013+A2:2021 *Concrete. Specification, performance, production and conformity*.

- EN 12390-11:2015 *Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.*
- EN12390-18- *Testing hardened concrete – Part 18: Determination of the chloride migration coefficient).*
- EN12390-19- *Testing hardened concrete – Part 19- Determination of electrical Resistivity.*
- EN 1992-1-1:2023 Eurocode 2: *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.*
- Izquierdo D. (2001) Basis of design for probabilistic treatment of reinforcement corrosion processes, PhD. Polytechnic University of Madrid. Faculty of Civil Engineering.
- fib Model Code for Concrete Structures 2020 (MC2020).*
- Sagüés, A. A. (2003). *Modeling the effects of corrosion on the lifetime of extended reinforced concrete structures.* Corrosion, 59(10).
- Tuutti, K. (1982) *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Institute (CBI) nº 4-82. Stockholm.