

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

C. Andrade^{1*} 

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

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

Recebido: 15/10/2025 | Correções recebidas: 21/11/2025 | Aceito: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

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.

Citar como: Andrade, C. (2026), “Valores de resistividade do concreto para as classes de resistência ao cloreto.”, 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora Carmen Andrade, participou em todos os aspectos da elaboração deste artigo.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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 resistividad para clases de resistencia a los cloruros.

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-01171730300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão da armadura é o processo que desencadeia o maior número de deteriorações no concreto estrutural. Para prevenir a deterioração prematura devido à corrosão, as normas estabelecem os seguintes requisitos com base no tipo de ambiente: a) espessuras mínimas de cobrimento, b) requisitos para as proporções dos componentes na mistura de concreto ou uma resistência mínima à compressão, c) proibição do uso de cloreto na mistura e d) limites na abertura das fissuras. Nos últimos anos, além desses requisitos, tem havido um crescente interesse no ajuste dos traços de concreto utilizando ensaios de desempenho (resistência a cloreto e carbonatação) e, em seguida, aplicando modelos para calcular o tempo até a corrosão da armadura.

Esses modelos para prever a progressão de cloreto ou carbonatação foram propostos há muitos anos, entre os quais se destacam os já bem conhecidos pelos pesquisadores (Tuutti 1982, Andrade 1989, 2014; Sagüés 2003; Izquierdo 2001). Esses modelos requerem, como parâmetros de entrada, resultados de ensaios que foram gradualmente padronizados (ASTM C1556; EN 12390-11) e que levaram ao que se denomina "Indicadores de Durabilidade" (Baroguel - Bouy 2002, Andrade 2006), os quais estabelecem determinados valores limite para a vida útil de cada cobrimento. Devido à dificuldade e ao custo desses ensaios, desde a década de 1990, também foram propostos modelos baseados na resistividade elétrica. Este é um método não destrutivo (Andrade 1993, 2004) e, portanto, muito mais prático e acessível aos laboratórios.

A incorporação efetiva de modelos ou indicadores em normas ainda é muito lenta, embora modelos já estivessem incluídos nos Anexos do Código de Concreto Estrutural em 2008 (EHE 2008). Atualmente, os requisitos de recobrimento da nova versão do Eurocódigo 2 (EC-2) (EN 1992-1-1) para concreto estrutural foram calibrados utilizando modelos (Andrade & Izquierdo 2023), mas esses modelos não foram incluídos na norma. Em outras palavras, os modelos de cálculo foram considerados "implicitamente". A razão para não sugerir um modelo específico deve-se à cautela internacional em relação à precisão e incerteza das previsões, dada a falta de calibração a longo prazo.

Um passo em direção à incorporação de indicadores e modelos de vida útil nos regulamentos está sendo dado no âmbito do comitê CEN TC-104-concreto (EC2) com o conceito proposto de "Resistência Ambiental (Exposure Resistance Classes - ERC)", que permitirão uma classificação de acordo com os resultados dos ensaios de comportamento/desempenho. No presente trabalho, esse conceito é brevemente explicado e tanto o modelo baseado na resistividade quanto sua simplificação são ilustrados, assim como os valores de resistividade que são consistentes com os níveis ERC que foram propostos para a resistência ao cloreto.

2. PROCEDIMENTO

O conceito de ERC é descrito inicialmente conforme aprovado pelo comitê de durabilidade EC2. Em seguida, são resumidos os métodos de ensaio para determinar os valores de resistência ao cloreto e o padrão de resistividade e, por fim, é apresentada uma explicação de como a resistividade foi derivada dos valores do coeficiente de difusão com base nos modelos utilizados.

2.1 Conceito de ERC

Nas normas europeias, os processos de deterioração potenciais são classificados com base nas Classes de Exposição, que, no caso da corrosão da armadura, são designadas XC para carbonatação, XS para ambientes com cloreto marinhos e XD para cloreto de outras fontes, como sais de degelo. As classes de exposição na EC2-2024 permanecem praticamente as mesmas da norma para o concreto como material (EN 206). O conceito ERC (Exposure Resistance Classes) é proposto para definir concretos resistentes a cada uma dessas classes de exposição. O conceito foi desenvolvido

apenas para a corrosão da armadura, mas pretende-se que seja aplicado também a outros tipos de ataque.

Os símbolos acordados para os ERC's foram XRC para resistência à carbonatação e XRDS para resistência a cloretos, sejam eles marinhos ou provenientes de sais de degelo. É importante notar que XRC (Resistência à Exposição à Carbonatação) não deve ser confundido com XC (Exposição à Carbonatação), pois este último classifica a agressividade do ambiente, enquanto XRC representa o nível de resistência a essa exposição.

É importante notar também que o estado limite de "corrosão" aceito para os ERCs não é a despassivação da armadura, pois esta é praticamente impossível de detectar com precisão. Em vez disso, aceitou-se que um certo período de propagação fosse incorporado à vida útil. Esse período foi convencionalmente definido em uma profundidade de corrosão de 50 µm para corrosão por carbonatação e 500 µm para corrosão por cloretos. Portanto, a vida útil consiste em um período de iniciação e um período de propagação, como Tuutti (Tuutti 1982) ilustrou em seu diagrama.

Para garantir uma transição suave do sistema atual, baseado na especificação da composição do concreto, para o uso de ERC, foi estabelecido um período de transição durante o qual ambos os sistemas podem coexistir. Portanto, os ensaios de carbonatação ou cloreto não são obrigatórios para todas as misturas; as ERC também podem ser atendidas por meio da composição do concreto. A novidade reside no estabelecimento de limites dentro desse sistema de ERC.

2.1.1 Cobrimentos EC2

Os valores dos cobrimentos para cada ERC's de resistência ao ataque por cloretos são apresentados na Tabela 1. Esses valores podem ser ajustados por cada país de acordo com sua experiência.

Tabela 1. Cobrimentos mínimos $c_{min,dur}$ para classes de exposição ao cloreto (EN 1992-1-1:2023).

ERC	Classes de exposição (cloreto)											
	XS1		XS2		XS3		XD1		XD2		XD3	
	Vida útil do projeto (anos)						Vida útil do projeto (anos)					
	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: As classes de XRDS para resistência à corrosão por cloretos foram derivadas da profundidade do teor crítico de cloretos [mm] (valor característico do percentil 90%), que corresponde a uma concentração de referência. (0,6% em massa de cimento (cimento Portland + adições tipo II)), supostamente obtido após 50 anos de exposição unidirecional a uma água do mar de referência (30 g/l NaCl) para 20 °C. A designação XRDS tem as dimensões do coeficiente de difusão [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$].

NOTA 2: O cobrimento mínimo $c_{min,dur}$ pressupõe-se que a execução tenha sido realizada de acordo com a norma EN 13670, pelo menos classe 2, e cura classe 2.

2.2 Normas de ensaio a utilizar

Para determinar se o concreto pertence a uma ERC ou a outra, é necessário submetê-lo a ensaios de desempenho. As normas europeias para ensaios em condições naturais (que refletem as condições de ensaio de um ambiente XS2 ou XD2 com umidade constante) e para ensaios acelerados no caso de cloreto são:

A norma de referência para a difusão de cloreto é a de difusão natural durante 90 dias, a partir de uma cura úmida de 28 dias em contato com uma solução de NaCl a 3% em massa. (EN12390-11 - *Testing hardened concrete — Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*)

Como alternativa acelerada pode ser utilizada a norma de migração EN12390-18 - *Testing hardened concrete – Part 18: Determination of the chloride migration coefficient*).

2.2.1 Resistividade

A norma de resistividade que pode ser utilizada é a EN12390-19- *Testing hardened concrete – Part 19- Determination of electrical Resistivity*, que sempre utiliza o método das 4 pontas e que é semelhante à recomendação da Alconpat .

2.3 Modelos para cálculo de cobrimentos

No comitê do EC2, diversos modelos foram utilizados para o cálculo, incluindo os do *fib Model Code* (MC2020) (Andrade & Izquierdo, 2023), que serão utilizados neste trabalho. Uma vez obtidas as profundidades da frente agressiva, os cobrimentos foram ajustados de forma consensual e racional, visto que a progressão entre as classes ERC deve ser de 5 e 10 mm, e não em frações menores.

2.3.1 Modelo de resistividade

Neste artigo não se detalha os modelos de carbonatação ou cloreto, que são aqueles propostos no MC2020 com um ou outro parâmetro de entrada, mas se descreve o modelo de resistividade devido à sua novidade.

A resistividade pode ser usada como um Indicador de durabilidade, assim como o coeficiente de difusão de cloreto ou a taxa de carbonatação, e em outro nível, é necessário usar um modelo de vida útil. O modelo completo baseado na resistividade é formulado para os períodos de iniciação e propagação, conforme expresso na equação (1) (Andrade, 2004).

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

Onde

- c é a espessura mínima do cobrimento, em cm.
- $\rho_{ef,0}$ é a resistividade efetiva após 28 dias de cura, em $\Omega \cdot \text{cm}$.
- q é o fator de idade, (-). Este fator é 0,8 vezes o valor do coeficiente de difusão (Andrade et al 2011).
- t_0 é a primeira medição da resistividade foi realizada aos 28 dias de idade.
- t_n é a última idade medida. Ambas as idades t_0 e t_n devem ser inseridas nas mesmas unidades.
- F_{xc} é o fator de exposição ambiental para o período de iniciação, em $\text{cm}^3 \cdot \Omega/\text{ano}$.
- P_{lim} é a penetração da corrosão considerada como limite. Para uma largura de fissura de 0,1 mm na superfície do concreto, considera-se uma perda de diâmetro da barra de 0,01 cm.
- S_w^τ que é o grau de saturação do concreto, o qual depende da tortuosidade τ , que em média pode ser considerada como tendo um valor de 2. Este fator depende do clima, se o concreto

está diretamente exposto à ação da chuva e da porosidade/qualidade do material.

- K_{corr} é o fator de proporcionalidade entre a taxa de corrosão e o inverso da resistividade, 30,16 $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{ano}$.

No caso dos cloretoes, a aplicação deste modelo envolve o cálculo dos três fatores do período de iniciação: a) reação ou combinação, r ; b) ambiental, F_{xc} ; e c) evolução com a idade, q . Para o período de propagação, aplicam-se também os seguintes fatores: o fator de idade, q , enquanto a fração do grau de saturação S_w , que depende da tortuosidade τ e pode ser considerada com um valor médio de 2, deve ser levada em conta tanto no período de iniciação quanto no de propagação, ou, alternativamente, um valor médio de resistividade pode ser introduzido para cada classe de exposição.

A Figura 1 mostra um diagrama do aumento da resistividade ao longo do tempo e com a umidade ambiente, considerando uma classe de exposição em condições submersas (concreto saturado) e outra na atmosfera, onde a resistividade aumentará porque o grau de saturação, S_w^2 , será menor. No caso dos cloretoes, as classes de exposição mais agressivas são aquelas em que o concreto é considerado permanentemente saturado, e nesses casos, o período de propagação a ser considerado como parte da vida útil será de 5 a 10 anos.

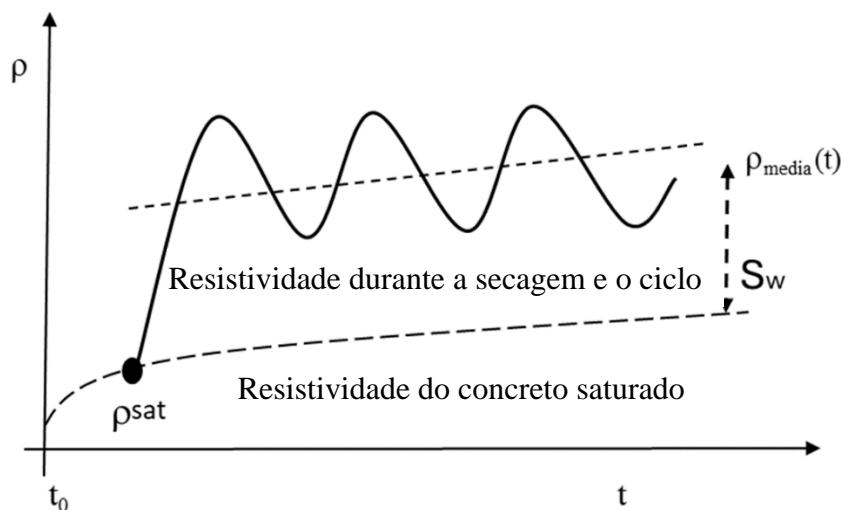


Figura 1. Evolução esquemática da resistividade ao longo do tempo em função da umidade ambiente.

A Tabela 2 apresenta os valores do fator ambiental F_{xc} para cloretoes em função das classes de exposição EC2, considerando o uso do coeficiente de difusão aparente. O fator de reação, r , pode ser incluído neste fator ambiental, como será explicado posteriormente, assim como o fator de idade q poder ser assumido com base no tipo de cimento (Tabelas 3 e 4), ou pode ser determinado experimentalmente registrando sua evolução ao longo do tempo (Figura 1).

Tabela 2. Fatores ambientais F_{xc} .

Classe de Exposição	XDS1	XDS2	XDS3
$F_{exp} (\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{ano})$	10000	17000	25000

2.4 Modelo simplificado baseado na resistividade

É possível simplificar a equação (1) para o período de propagação no caso de cloretoes; em vez de calculá-los, pode-se adotar, por exemplo, para exposições XS2 ou XD2 sempre saturadas, um período de propagação de 5 anos, o que deixaria $t_i = 45$ anos para uma vida útil de 50 anos.

Em relação ao período de iniciação, o efeito da reação do cloreto com as fases do cimento (fator de reação, r) pode ser incluído no valor do coeficiente ambiental na equação (2). O efeito da reação do cloreto no fator ambiental, que é $F_{xc} = 1E-4 \Omega\text{cm}^3/\text{s}$, pode ser obtido a partir do ensaio de difusão (ou migração) natural multiplicando (equação (2)) a resistividade medida na mesma amostra por D_{ap} :

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

Para calcular a profundidade da frente crítica de cloreto ou a espessura do cobrimento, uma vez assumida a equivalência da equação (2), é possível aplicar a lei da raiz quadrada do tempo, que está na base de qualquer processo de difusão (como foi feito para desenvolver a equação (1)). Isso resulta na equação (3):

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

O valor de $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$ é aplicável para ensaios de difusão natural. No caso de ensaios de migração acelerada, como o ensaio tem curta duração e os cloretos praticamente não se combinam, o valor que deve ser usado é $F_{xc} = 13 \times 10^{-4}$.

Para calcular o fator de idade, basta acompanhar a evolução da resistividade ao longo do tempo (idealmente entre 28 e pelo menos 90 dias, mais os 90 dias de duração do ensaio), conforme mostrado na Figura 2, e ajustar a evolução para obter o expoente de idade q . A fórmula a ser aplicada é a expressa na equação (4).

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

Esta formulação simplificada, que requer apenas a calibração da resistividade com o coeficiente de difusão aparente (com a reação dos cloretos com as fases do cimento) e o monitoramento do valor da resistividade até uma idade predeterminada, tem aplicação prática muito imediata e, portanto, foi aplicada a valores de coeficiente de difusão obtidos a partir de modelos probabilísticos, conforme explicado abaixo.

3. RESULTADOS

As designações de classe ERC finalmente acordadas para cloretos são apresentadas na primeira coluna das Tabelas 1 a 6 (EN 1992-1-1-2023). Foram identificados dez níveis ERC, que podem ser combinados ou subdivididos conforme decisão dos organismos nacionais de normalização, com base na sua experiência local.

As colunas seguintes na Tabela 3 mostram os valores do coeficiente de difusão que classificam os níveis de ERC. Esses valores ainda não foram padronizados, e os apresentados são os propostos pelo autor deste trabalho com base em:

- Considere os valores de designação ERC como valores médios do coeficiente de difusão. Portanto, os valores característicos seriam determinados pelo coeficiente de variação (CV) obtido no ensaio, sugerindo que um lote não deve ser aceito se o CV for superior a 30%.
- Como o coeficiente D_{ap} diminui ao longo do tempo (evolução com a idade, fator α), os valores do coeficiente obtidos da equação (4) também são especificados para $\alpha = 0,3-0,4-0,5-0,6$.
- Os valores de cobrimento, de acordo com a definição indicada na Nota 1 da Tabela 1, foram

obtidos por meio de cálculos probabilísticos com o modelo de cloreto *fib MC2020* para assumir uma probabilidade de corrosão de 7-10%.

Tabela 3. Valores médios do coeficiente de difusão* D_{ap} em $[cm^2/s]$ para as classes de XRDS com base em ensaios de difusão natural (EN 12390-11) para ambientes com cloretos.

Valor α ao longo de 50 anos	Valor médio do coeficiente de difusão aparente para vários expoentes de idade. (Vida útil de 50 anos, $y t_0 = 28$ dias)				
	$\alpha \geq 0,0$	$\alpha \geq 0,3$	$\alpha \geq 0,4$	$\alpha \geq 0,5$	$\alpha \geq 0,6$
Tipo de cimento - Norma europeia*	CEM I baixo teor de aluminatos	CEM I alto teor de aluminatos	CEM II (<20% de adição)	CEM IV (< 40% de adição)	CEM III (até 80% de escória)
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

*Sugestão do autor. Não aprovada em nível europeu.

Aplicando a equação (3) a esses valores e usando um valor de $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$, os valores de resistividade equivalente na tabela 4 são obtidos.

Tabela 4. Valores médios de resistividade ($\Omega \cdot m$) para ambientes com cloretos em 28 dias de acordo com a norma EN 12390-19 (no caso da resistividade, o CV é da ordem de 15%)

Valores médios de resistividade ($\Omega \cdot m$) para vários expoentes de idade usando um valor de $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$ (50 anos de vida útil e $t_0 = 28$ dias)					
Valor α ao longo de 50 anos	$\alpha \geq 0,0$	$\alpha \geq 0,3$	$\alpha \geq 0,4$	$\alpha \geq 0,5$	$\alpha \geq 0,6$
Tipo de cimento - Norma europeia*	CEM I baixo teor de aluminatos	CEM I alto teor de aluminatos	CEM II (<20% de adição)	CEM IV (< 40% de adição)	CEM III (de 40 a 80% de escória)
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

*Sugestão do autor

Tabela 5. Cobrimentos (mm) de acordo com EC2 e resistividades ($\Omega \cdot m$) equivalentes aos coeficientes de difusão aparentes deduzidos dos ERC's para a $\alpha = 0,3$ e os fatores ambientais F_{xc} da Tabela 2.

ERC $D_{ap} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ $\rho (\Omega \cdot \text{m})$	Classes de exposição (cloreto para $\alpha=0,3$) c (mm); Resistividade ($(\Omega \cdot \text{m})$)					
	XS1/XD1		XS2/XD2		XS3/XD3	
	Vida útil do projeto (anos)					
	50	100	50	100	50	100
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	

Como exemplo, a Tabela 5 também calcula as resistividades equivalentes aos coeficientes de difusão aparente da Tabela 3, mas utilizando os fatores ambientais da Tabela 2, em vez de usar o valor de $F_{xc} = 7,5 \times 10^{-4}$. O exemplo foi realizado para um fator de idade de 0,3. Nesta tabela, para facilitar o uso, os valores mínimos de resistividade foram adicionados abaixo dos α valores de cobrimentos do Eurocódigo 2, utilizando os fatores ambientais da Tabela 2 para a equivalência.

4. DISCUSSÃO

Atualmente, é consenso que os modelos de previsão do tempo até a corrosão não são calibrados para o longo prazo, portanto, sua precisão ou incerteza permanecerão desconhecidas até que uma experiência suficientemente longa permita a comparação de ensaios de curto prazo com resultados de 50 ou 100 anos. Uma fonte adicional de incerteza é o ambiente, visto que, embora os valores sejam agrupados em classes de exposição (XCs), variações locais de umidade e temperatura podem ocorrer dentro do mesmo ambiente. Ciente dessa incerteza preditiva, contudo, um consenso completo foi alcançado no Comitê CEN-TC250/SC2/WG1/TG10, que utilizou cinco modelos

diferentes de cloretos com parâmetros de entrada variáveis. Os cobrimentos na Tabela 1 foram obtidos arredondando-se os resultados brutos de penetração de cloretos desses modelos para minimizar os saltos entre as ERC's. As espessuras devem ser de 5 ou 10 mm, e não frações. Portanto, as espessuras de cobrimento propostas na Tabela 3 não são resultado exclusivo de um cálculo matemático exato; arredondamentos e opiniões de especialistas foram aplicados aos valores calculados. Além disso, esses cobrimentos correspondem à profundidade mínima fornecida pela resistência nominal, à qual deve ser adicionada a margem de tolerância de 5 ou 10 mm. Consequentemente, qualquer tentativa de reproduzir os valores da Tabela 1 pode levar a discrepâncias. Em qualquer caso, esses cobrimentos são muito semelhantes aos utilizados na versão anterior do Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1:2023) e podem ser adaptados por cada país de acordo com sua experiência local.

Exemplo

No caso da resistividade, uma vez calibrada com ensaios iniciais de difusão natural de cloreto e usando a expressão (2), determinada para cada tipo de concreto, a vantagem prática de ser um método barato e não destrutivo permite que o controle de qualidade seja estendido a uma população de amostras muito maior. Esta foi a metodologia aplicada na construção do terceiro conjunto de eclusas do Canal do Panamá (Andrade et al. 2016), o que dispensou a necessidade de inúmeros ensaios de cloreto.

4.1 Cálculo simplificado de cobrimentos

Embora, como mencionado, os cobrimentos tenham sido calculados usando modelos que empregaram os valores médios do coeficiente de difusão aparente de cloretos, com diversos CVs e assumindo uma probabilidade de falha de 7 a 10%, três casos são apresentados a seguir, nos quais se demonstra que esses cobrimentos também podem ser deduzidos aproximadamente a partir de um cálculo bastante simplificado.

Aplicando a equação (3), na Tabela 6 são indicados os cobrimentos das classes XRDS1, XRDS3 e XRDS10 como exemplos para a classe de exposição XS2, que corresponde às condições de imersão total (as mesmas do ensaio de difusão natural). Os cobrimentos usados como exemplos são para 50 anos, e os valores de resistividade ou coeficiente de difusão aparente não incluem o expoente de idade.

Tabela 6. Cobrimentos para a classe XS2 e 50 anos e aqueles obtidos com o cálculo simplificado da raiz quadrada do tempo e usando um valor de $F_{xc} = 17000$ (tabela 2).

Aula ERC	Cobrimento mínimo (mm) na Tabela 1 para a classe XS2 e 50 anos sem expoente de idade	Valor da resistividade ($\Omega \cdot m$)	Profundidade (mm) calculado com a equação (3) e 50 anos sem expoente de idade
XRDS1	25	7500	25,1
XRDS3	40	2500	43,5
XRDS10	80	750	79,4

Pode-se verificar que os valores de cobrimento propostos na Tabela 1 pela EC2, considerando uma probabilidade de falha de 10%, são razoavelmente próximos daqueles que podem ser calculados de forma simplificada usando a equação (3). Isso se aplica tanto ao coeficiente de difusão aparente quanto à resistividade equivalente. Os 5 ou 10 mm adicionais devem sempre ser aplicados a esses valores de cobrimento, pois são valores mínimos, absorvendo assim a discrepância decorrente do arredondamento necessário para múltiplos de 5 ou 10. Esse cálculo simplificado permite ao projetista aproximar seu caso específico sem a necessidade de cálculos probabilísticos.

5. CONCLUSÕES

A utilização da resistividade elétrica como parâmetro indicativo da resistência ao cloreto é uma prática cada vez mais difundida, mas necessita de valores de referência em relação aos cobrimentos e leva em consideração o aumento da resistividade ao longo do tempo.

Este artigo apresenta um método simplificado para a obtenção do fator ambiental, F_{xc} , a partir de um ensaio simultâneo de difusão de cloreto e resistividade, monitorando-se o aumento da resistividade ao longo do tempo para determinar um fator de idade entre 28 e pelo menos 90 dias. Com base na equivalência entre resistividade e coeficiente de difusão aparente (ensaio natural ou de migração), os cobrimentos necessários podem ser calculados de forma simplificada utilizando a lei da raiz quadrada do tempo. Esses cálculos simplificados são uma aproximação de engenharia que auxiliará o projetista.

São fornecidos desta forma os ERC's utilizados no Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1:2023), os valores limite mínimos de resistividade equivalentes aos coeficientes de difusão aparente.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de hipóteses prévias sem financiamento externo, pelo que gostaríamos de agradecer ao CIMNE pelos recursos humanos e logísticos disponibilizados ao autor.

7. REFERÊNCIAS

- 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 a 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.