GUÍA TÉCNICA

Guía de protección frente a la corrosión del hormigón armado mediante el uso de inhibidores de corrosión y/o protección catódica



MAPEI PROCAINSA QUIMILOCK

Guía de protección frente a la corrosión del hormigón armado mediante el uso de inhibidores de corrosión y/o protección catódica

MAPEI PROCAINSA QUIMILOCK

Título:

Guía de Protección frente a la Corrosión del Hormigón Armado
mediante el uso de Inhibidores de Corrosión y/o Protección Catódica.

Autores:

Carmen Andrade Perdrix.
Dra. Química Industrial.
Presidente UEATc (1994-1998), Presidente RILEM (2000-2003).
Presidente Alconpat Internacional (2017-2021).

Gabriel-Angel Ortín Rull.
Director de Asistencia Técnica de Mapei Spain, S.A.U.
Arquitecto.

Joan Soldevila Bartolí.
Director Gerente de Procainsa, S.A.
PhD en Ciencias Geológicas.
CP2 Cathodic Protection Technician.
por el NACE International Institute.

Jesús Orte Crespo,
Director Técnico de Quimilock S.A.
Licenciado en CC. Químicas.

Edita:

Mapei Spain, S.A.U., Quimilock, S.A., Procainsa, S.A.

Diseño Gráfico:
Eduard Solé / Solé Creativos, S.L. / www.sole.es

Edición:
Barcelona, enero 2024.

Depósito legal:
DL B 22302-2023.

La redacción de este Libro ha sido posible gracias a la colaboración de expertos y empresas especializadas en productos y sistemas de protección frente a la corrosión, con los que hemos podido crear un grupo de trabajo multidisciplinar compuesto por los autores y sus equipos de asistencia técnica, que ha permitido abordar todos los aspectos referentes a la prevención y protección de estructuras, frente al fenómeno de la corrosión con el máximo rigor.

Antonio Faura

PRÓLOGO

Año tras año no cesan de invertirse en nuestro país miles de millones de euros en infraestructuras, siendo, la conservación y el mantenimiento, factores fundamentales que hacen que estas inversiones no sean efímeras y contribuyan a enriquecer nuestro patrimonio civil e industrial. Sin embargo, mientras que las inversiones y la construcción de nuevas estructuras, están dotadas de una extensa literatura y detallada normativa que describe y regula su diseño y construcción, la conservación y el mantenimiento es parvo en este aspecto.

Esta situación es difícil de justificar ante una sociedad que demanda cada vez más un mayor nivel de eficiencia en el uso de los recursos públicos y naturales en su camino hacia un desarrollo sostenible de la misma, lo que es crítico, cuando el incremento del patrimonio es superior al de los presupuestos de gasto destinados a su conservación y mantenimiento.

Es por tanto patente la necesidad de disponer y divulgar documentos que ayuden a los profesionales encargados de la conservación y el mantenimiento de estructuras. Es en este marco en el que el presente texto viene a llenar un importante hueco, y así es, pues esta Guía aporta luz sobre un fenómeno que es especial talón de Aquiles de las estructuras de hormigón armado, ya que describe de forma concisa y técnicamente rigurosa la vigilancia y el tratamiento de protección frente a la corrosión de las armaduras, información que es importante conocer y aplicar adecuadamente para conseguir una óptima conservación de este tipo de estructuras.

Esta necesidad, trasmitida a los autores de este documento, ha sido el germen que, gracias tanto a la iniciativa de Antonio Faura como al buen hacer de quienes han atendido a su llamada a colaborar: Carmen Andrade, Jesús Orte, Gabriel Ortín y Joan Soldevila, cuyo aporte de conocimiento y experiencia queda patente en este documento, dando como fruto este valioso trabajo que servirá de apoyo a todos los profesionales del campo de la conservación de estructuras de hormigón armado para conseguir realizar su trabajo con una mayor calidad y eficiencia.

José Antonio Gómez Barquín
Jefatura de Área de Puentes y Pasos Superiores.
Dirección General de conservación y mantenimiento.
Dirección Técnica.
Subdirección de Infraestructura y Vía.
ADIF.

Índice

1. INTRODUCCIÓN 8

2. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA INSPECCIÓN PREVIA 12
- 2.1. Diagnóstico del grado de corrosión y su evolución futura 12
- 2.2. Elementos básicos de la inspección previa 12
- 2.3. Clasificación en lotes homogéneos 14
- 2.4. Inspección visual de la estructura 15
- 2.5. Toma de datos in situ 15
- 2.6. Urgencia de Intervención 16

3. MÉTODOS DE REPARACIÓN QUE ABORDA LA PRESENTE GUÍA 17

4. TÉCNICAS DE REPARACIÓN DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS 19

5. MEDIDA DE LA EFICACIA DE LA REPARACIÓN 21
- 5.1. Control de la eficacia de la protección catódica 21
- 5.2. Medida de la PVT (Passivation Verification Technique) 22
- 5.3. Medida de la velocidad de corrosión 22

6. ÁNODOS DE SACRIFICIO 24
- 6.1. Normativas 24
- 6.2. Características de los sistemas 24
- 6.3. Fases de puesta en obra 25
  - 6.3.1 Sistema de ánodos internos MAPESHIELD I 25
    - *6.3.1.1 Protección catódica galvánica en estructuras que necesiten ser reparadas* 25
    - *6.3.1.2 Protección catódica galvánica en estructuras de nueva construcción* 27
  - 6.3.2 Sistema de ánodos externos MAPESHIELD E 28
  - 6.3.3 Ejemplos 35
- 6.4. Métodos de verificación de la eficacia 37
- 6.5. Mantenimiento 37
- 6.6. Especificaciones de proyecto 37
  - 6.6.1 Consumo de los ánodos MAPESHIELD 38
  - 6.6.2 Elección y espaciado de los ánodos MAPESHIELD I 41
  - 6.6.3 Elección y espaciado de los ánodos externos MAPESHIELD E 25 42

7. CORRIENTE IMPUESTA **44**
7.1. Normativa 44
7.2. Características de los sistemas 44
7.3. Fases de puesta en obra 46
7.3.1 Estructuras que necesiten ser reparadas 46
7.3.2 Estructuras de nueva construcción 47
7.4. Métodos de verificación de la eficacia 48
7.5. Mantenimiento 48
7.6. Especificaciones de proyecto 49

8. COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS DE CORRIENTE IMPUESTA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO **50**

9. INHIBIDORES MIGRATORIOS **51**
9.1. Normativa 51
9.2. Características de los sistemas 51
9.3. Fases de puesta en obra y ejemplos 55
9.4. Métodos de verificación de la eficacia 58
9.5. Mantenimiento 58
9.6. Especificaciones de proyecto 58

10. USO CONJUNTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA E INHIBIDORES **61**

11. ELECCION DEL MÉTODO DE REPARACIÓN **63**

12. CERTIFICACIONES QUE ACREDITAN EL NIVEL DE COMPETENCIA DEL PERSONAL EN PROTECCIÓN CATÓDICA **66**

13. REFERENCIAS **68**

1. Introducción

A PESAR DE QUE INICIALMENTE SE PENSÓ QUE EL MATERIAL PERMANECERÍA INTACTO CON EL PASO DE LOS AÑOS, A LO LARGO DEL ALREDEDOR DE 120 AÑOS DE APLICACIÓN SE HAN DETECTADO DIFERENTES TIPOS DE ATAQUE AL PROPIO HORMIGÓN O A SU ARMADURA, SIENDO LA CORROSIÓN DE ÉSTA EL RETO MÁS IMPORTANTE QUE TODAVÍA OBLIGA A UN DISEÑO ESPECÍFICO PARA ASEGURAR SU DURABILIDAD

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todas las sociedades industrializadas debido a tres características fundamentales:

- la posibilidad de darle forma en la misma obra.
- la relativa accesibilidad a la tecnología de fabricación.
- su relativo bajo costo.

Estas características unidas a su asociación con el acero de su armadura, que le confiere propiedades de resistencia no solo a compresión, sino también a tracción, han hecho que sea el material preferido en la mayoría de las aplicaciones, sea en edificación como en obra pública e infraestructuras.

La feliz asociación acero/hormigón basada en la adherencia entre ambos que lo convierten en un material compuesto, no solo es de tipo físico sino también de tipo químico, pues la alcalinidad aportada por la hidratación del cemento es capaz de pasivar el acero y mantenerlo libre de corrosión de forma indefinida, mientras no cambie la composición química en el entorno de la armadura.

El hormigón armado se empezó a usar industrialmente a principios del siglo XX y su composición, si bien se ha mantenido básicamente la misma, ha evolucionado muchísimo en términos de los tipos de cemento utilizados que son muy variados. En la actualidad, además, los nuevos tipos de acero de su armadura y de los aditivos, son evoluciones que han permitido elevar las resistencias mecánicas y modular su adaptación a las múltiples circunstancias ambientales y de geometría de los elementos estructurales.

A pesar de que inicialmente se pensó que el material permanecería intacto con el paso de los años, a lo largo del alrededor de 120 años de aplicación se han detectado diferentes tipos de ataque al propio hormigón o a su armadura, siendo la corrosión de ésta el reto más importante que todavía obliga a un diseño específico para asegurar su durabilidad.

En la actualidad, dada la experiencia acumulada es asequible proyectar para durabilidades de 50 años, pero resulta mucho más incierto plantear durabilidades iguales o mayores a 100 años, ya que no hay suficiente experiencia dado que los hormigones de entonces son muy diferentes de los actuales, lo que dificulta la extrapolación de los comportamientos esperables.

Cuando se produce la corrosión en la armadura, ésta se puede detectar cuando se produce un aumento de su volumen debido a la formación de óxidos y consecuentemente se observan manchas o agrietamientos

superficiales en el hormigón. Hay casos en que tal fisuración no se produce porque el óxido difunde por los poros del hormigón sin provocar tensiones que lo agrieten. Esta situación se puede dar en hormigones muy húmedos y porosos. El proceso puede proseguir deteriorando el hormigón del recubrimiento hasta desprenderlo y dejar visible la armadura (figuras 1 y 2). La consecuencia es una reducción de la capacidad portante de la estructura al perder parte de su sección de hormigón y de acero y también la adherencia entre ellos, lo que puede llegar a ocasionar su colapso.

Es importante detectar los primeros estadios del proceso corrosivo pues es más sencillo (y económico) actuar correctivamente mediante las técnicas de reparación, sean por sistemas simples (inhibidores o protección catódica), o mixtos (inhibidores + protección catódica). La experiencia en este campo demuestra que cuanto mayor es el ataque corrosivo más costosa y compleja será la reparación del deterioro.

Es por ello muy importante anticiparse a posibles daños futuros de corrosión, sobre todo en aquellas zonas expuestas a presencia de cloruros (ambientes marinos o incluso próximos a zonas marinas debido a los aerosoles de cloruros que transportan los vientos, entre otras circunstancias ajenas) para actuar preventivamente. En estos casos las soluciones son normalmente mucho menos costosas que cuando ya se ha iniciado el proceso corrosivo.



Figura 1. Ejemplo de corrosión de armaduras en estado avanzado

Cuánto y cómo intervenir una estructura dañada

Ambas preguntas son esenciales como parte del diagnóstico que siempre debe ser hecho por especialistas a no ser que los daños sean muy superficiales y poco relevantes.

De forma genérica a “cuanto intervenir” se puede generalizar que siempre es mejor intervenir menos que más, para conservar el máximo del hormigón inicial, a no ser que este sea de muy mala calidad o esté muy fisurado. Sin embargo, es fundamental no dejar “daños ocultos” sean de la armadura corroída o de hormigón con aparente buen aspecto, pero muy microfisurado o sin suficiente capacidad portante. La consistencia del hormigón puede ser medida in situ de forma sencilla con ultrasonidos que permiten al menos comparar entre zonas y así comprobar si hay daños ocultos en el hormigón.

Para saber si hay armadura corroída que no haya producido daños que se detecten visualmente, se debe acudir a la medida electroquímica de la velocidad de corrosión. Velocidades superiores a 0,1-0,2 μA/cm^2 son indicativas de corrosión activa. Estos valores junto con los de potencial de corrosión y resistividad, que se miden todos simultáneamente, permiten el dictamen cierto de la posibilidad de daños no visibles.



Figura 2. Ejemplo de corrosión de armaduras en estado avanzado

En cuanto a “cómo” intervenir se puede hacer acudiendo a uno o varios sistemas en función de la factibilidad del método y de su coste, aunque éste hay que valorarlo siempre en función de su durabilidad, ya que costes menores pero de menos durabilidad pueden resultar más caros que otros de mayor inversión inicial. En la presente Guía se describen dos métodos de reparación diferentes del parcheo que pueden ser aplicados individualmente o a la vez en el mismo elemento, dependiendo de las circunstancias del deterioro.

En la presente Guía también se resumen primero las bases de la inspección y diagnóstico del estado de una estructura, ya que es básico realizar un diagnóstico correcto, y luego se describen con más detalle los dos métodos de reparación que son menos conocidos que el parcheo: los inhibidores de corrosión y la protección catódica.

ES IMPORTANTE DETECTAR LOS PRIMEROS ESTADIOS DEL PROCESO CORROSIVO PUES ES MÁS SENCILLO (Y ECONÓMICO) ACTUAR CORRECTIVAMENTE MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE REPARACIÓN, SEAN POR SISTEMAS SIMPLES (INHIBIDORES O PROTECCIÓN CATÓDICA), O MIXTOS (INHIBIDORES + PROTECCIÓN CATÓDICA)

2. Elementos básicos de la Inspección Previa

2.1 Diagnóstico del grado de corrosión y su evolución futura

Los efectos que se producen en el elemento estructural cuando la armadura se empieza a corroer son:

- fisuración del recubrimiento.
- pérdida de adherencia.
- pérdida de sección efectiva de acero.
- pérdida de sección efectiva de hormigón.

La consecuencia de la evolución progresiva de todos estos factores produce una pérdida de la capacidad portante del elemento estructural con el tiempo. Es por ello que en una estructura que sufre corrosión, es necesario conocer tanto el estado de fisuración y resistencia remanente del material hormigón, como la pérdida de sección de la armadura que son los parámetros básicos que permiten relacionar:

- el estado del material con el deterioro estructural y
- el estado presente con la evolución futura.

2.2 Elementos básicos de la inspección previa

En este capítulo se expresan de forma esquemática los pasos esenciales de la inspección y diagnóstico (véase figura 3) pero no se describirán en detalle, ya que hay otros documentos más extensos para ello como por ejemplo: Manual CONTECVET(2001), Guía de Puertos (2018), Código Estructural (2022).

La inspección tiene como objetivo conseguir los datos que permitan dictaminar correctamente la causa de los deterioros y a su vez predecir el comportamiento futuro de la estructura. La inspección,

- puede ser simplemente visual, para detectar las áreas donde aparecen los deterioros.
- puede conllevar la realización de análisis en la propia estructura o en el laboratorio.

Siempre es necesario previamente realizar “lotes” de inspección, ya que luego se puede dictaminar el estado de cada lote sin necesidad de hacer una inspección a todos los elementos estructurales. Estos lotes se realizarán a partir de la inspección visual o de la observación de los planos.

Las etapas de una inspección y diagnóstico (figura 3) consisten en:

- observación de los planos y detalle de armado de la estructura, con:
  - la identificación de las tipologías estructurales.
  - su geometría y dimensiones.
  - los espesores de recubrimiento.
  - los diámetros de las armaduras.
- conocimiento de los eventos sufridos por la estructura con identificación, si es posible, del registro de cuando empezaron los daños, si es que está visiblemente deteriorada.
- la clasificación en lotes homogéneos en cuanto a posible vida residual.
- la observación visual de la estructura:
  - levantamiento de daños en su caso.
  - identificación de la clase de ambiente y microambientes en los que está situada.

Las etapas de una inspección y diagnóstico (figura 3) consisten en:

- observación de los planos y detalle de armado de la estructura, con:

  - la identificación de las tipologías estructurales.
  - su geometría y dimensiones.
  - los espesores de recubrimiento.
  - los diámetros de las armaduras.
- conocimiento de los eventos sufridos por la estructura con identificación, si es posible, del registro de cuando empezaron los daños, si es que está visiblemente deteriorada.
- clasificación en lotes homogéneos en cuanto a posible vida residual.
- observación visual de la estructura:
  - levantamiento de daños en su caso.
  - identificación de la clase de ambiente y microambientes en los que está situada.
  - identificación de las zonas de realización de las medidas.
- toma de datos in situ en función de los lotes finalmente identificados con elementos homogéneos.
- emisión del diagnóstico de las causas de la corrosión.
- predicción de la evolución esperable de la corrosión de cada lote agrupado por vida residual y a partir de ella, de la urgencia de la intervención.

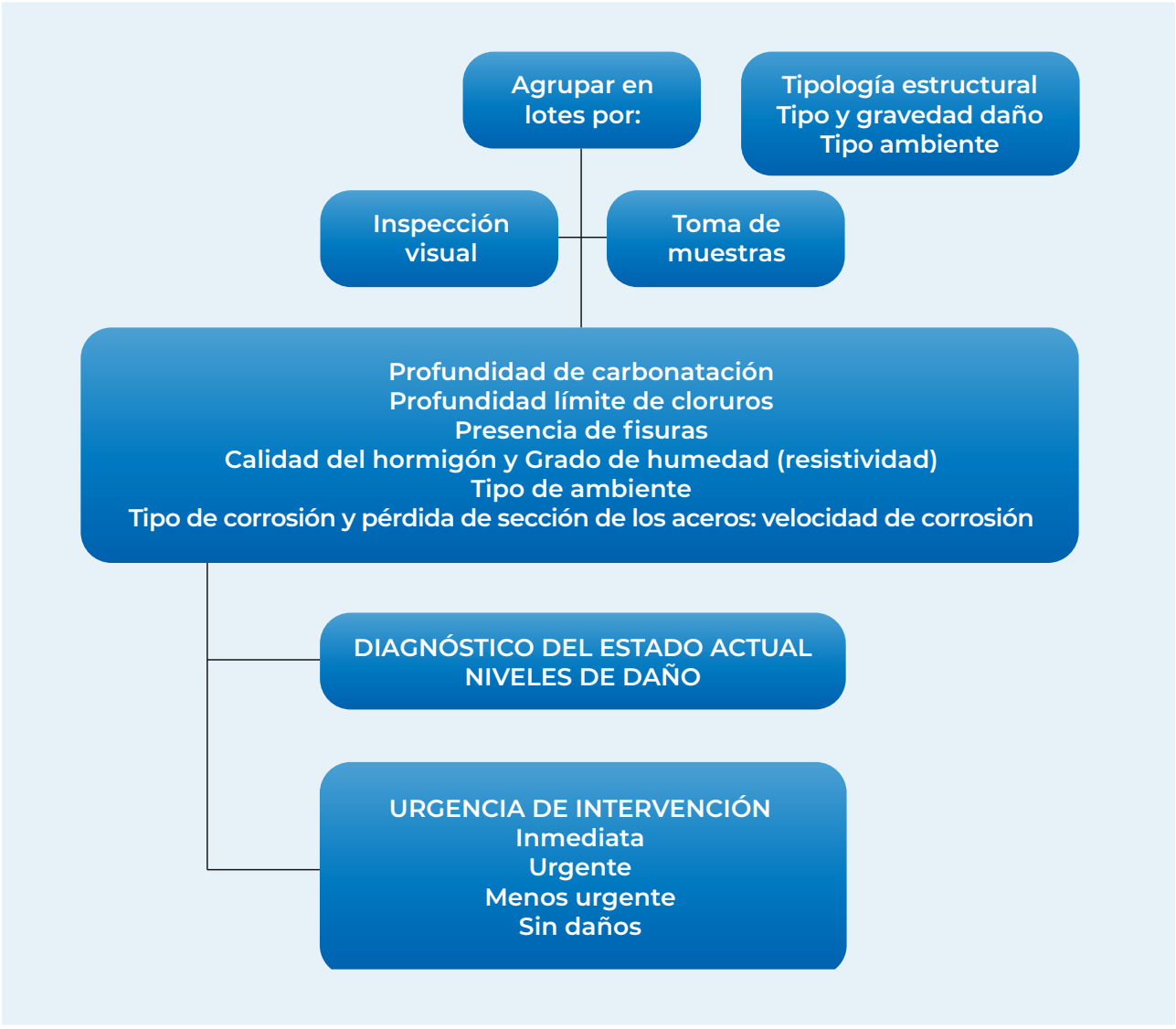


Figura 3. Esquema de las fases de una evaluación estructural

2.3. Clasificación en lotes homogéneos

Esta es una de las tareas más delicadas y de la que depende el buen diagnóstico de la situación de la estructura. Los lotes serán las unidades de inspección, de tal manera que habrá un resultado/lote de cada uno de los parámetros que se midan. Cuantos menos sean los lotes, menor será el costo de la inspección y menor el número de diagnósticos.

Los tres criterios fundamentales para la primera selección de los lotes son:

1. la tipología estructural.
2. la agresividad del ambiente.
3. el grado de deterioro y su extensión.

Se sugiere empezar dividiendo la estructura por la tipología estructural de sus elementos es decir, se deben agrupar los elementos por su función estructural o funcional. En cada lote de elementos se tratará de identificar la clase de ambiente y el grado de deterioro. De esta manera resultan, al menos:

N° lotes = n° tipologías por clases ambiente/tipología por nivel de deterioro.

En los niveles de deterioro se puede hacer una escala de 2 (no deterioro o si deterioro) o de 3 niveles:

- no deteriorado.
- poco deteriorado.
- muy deteriorado.

Una vez realizada una primera agrupación de los elementos estructurales en lotes homogéneos, que puede ser la definitiva, hay que plantear si se reduce el número de lotes. Por ejemplo, que constituyan un solo lote todos los elementos en sus zonas no deterioradas. Cada caso exige un estudio específico, siempre tratando de que el número de lotes sea lo más reducido posible.



Figura 4. Clasificación en lotes de un viaducto en contacto con el agua

En la figura 4 se pone un ejemplo simple de un viaducto situado al borde del mar, donde se han marcado las zonas por "tipología estructural" (3 Lotes). De ellas las zonas orientadas hacia el mar están más corroídas que las que dan cara hacia el interior de tierra (2 lotes) y, en cuanto a los daños, sólo la pila en contacto con el mar está corroída (2 lotes – con y sin corrosión). Por tanto, el máximo de lotes resulta 3x2x2= 12 medidas, de las que se pueden realizar 10 si el lote de "no corrosión" coincide con las zonas "cara al interior"; quedaría entonces 3x1x2= 6 medidas.

2.4. Inspección visual de la estructura

La observación visual tiene por objeto los aspectos antes señalados de hacer un levantamiento de daños, la comprobación de la clase de ambiente, la posible incidencia de microclimas y la Identificación de las zonas de medida en cada lote.

En esta fase se tomarán también los datos necesarios para la comprobación posterior de las cargas actuantes.

2.5. Toma de datos in situ

Es necesario tomar datos sobre la geometría y dimensiones precisas de los elementos estructurales para el caso de que se vaya a proceder a su recálculo.

En cuanto a la toma de datos o de muestras, se recomienda tomar 3 medidas al menos de los parámetros que se miden con métodos no destructivos. De ensayos destructivos de resistencia del hormigón y del acero, al menos 3 de la estructura completa si el hormigón y la armadura son los mismos en toda ella y, si no, es necesario extraer 2-3 testigos por cada tipo de hormigón o de armadura (cada lote). De carbonatación y cloruros se extraerá al menos 1 testigo por lote.

Como ensayos no-o casi-no destructivos, se pueden mencionar como posibles la medida de:

- la humedad relativa ambiental y la temperatura.
- la resistencia superficial, con esclerómetro.
- la velocidad de ultrasonidos y el módulo dinámico.
- la corrosión (potencial y velocidad de corrosión).
- la resistividad (para detectar grado de saturación) e identificar la existencia de drenajes funcionando mal y la existencia de encharcamientos.
- el diámetro de la armadura, incluida la perdida de sección en su caso.
- la anchura y forma de las fisuras.
- las deformaciones o geometrías y desplazamientos anómalos.

En cuanto a ensayos destructivos:

- la resistencia a compresión en testigos.
- la resistencia a tracción de la armadura, si es posible obtener muestras sin afectar a la estructura.
- la profundidad de carbonatación, el perfil de cloruros y la porosidad del hormigón.
- observación a microscopio si existen ataques al hormigón como la reacción árido-álcali, la formación de etringita o de fisuraciones internas.

Como resumen, el estado actual de la estructura puede dictaminarse mediante la descripción y aportación de los valores de los parámetros de corrosión, pueden agruparse los resultados en un índice de corrosión (IC) (evaluación simplificada del Manual CONTECVET) que resulta de clasificar en valores de 1 a 4 los parámetros del material según se indica en la tabla 1. Así, según sea el nivel del Índice de corrosión, se puede luego dictaminar sobre la urgencia de la intervención.

Tabla 1. Indicadores para elaborar el Índice de corrosión

INDICADOR	NIVEL 1	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV
Profundidad de carbonatación [X_{CO2}]	$X_{CO2} = 0$	$X_{CO2} < c$	$X_{CO2} = c$	$X_{CO2} > c$
Nivel de cloruros [X_{cl}]	$X_{Cl}^- = 0$	$X_{Cl}^- < c$	$X_{Cl}^- = c$	$X_{Cl}^- > c$
Fisuración por corrosión en el recubrimiento [w]	Sin fisuras	Fisuras < 0.3 mm	Fisuras > 0.3 mm	Fisuración generalizada y desprendimiento del recubrimiento
Hormigón (Ωm) [Ρ]	> 1.000	500 - 1.000	100 - 500	< 100
Pérdida de sección [Ø]	< 1%	1 - 5%	5 - 10%	> 10%
Velocidad de corrosión ($\mu A/cm^2$) [I_{Corr}]	< 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	> 1

2.6. Urgencia de Intervención

La urgencia de intervención se establece en función del grado de deterioro y de las consecuencias de un posible fallo o accidente. Las consecuencias del fallo de la estructura pueden ser: leves, moderadas o graves. Así en la Tabla 2 se establecen unos plazos de intervención según sea el Índice de Corrosión. Estos plazos se pueden variar en función de las consecuencias del fallo.

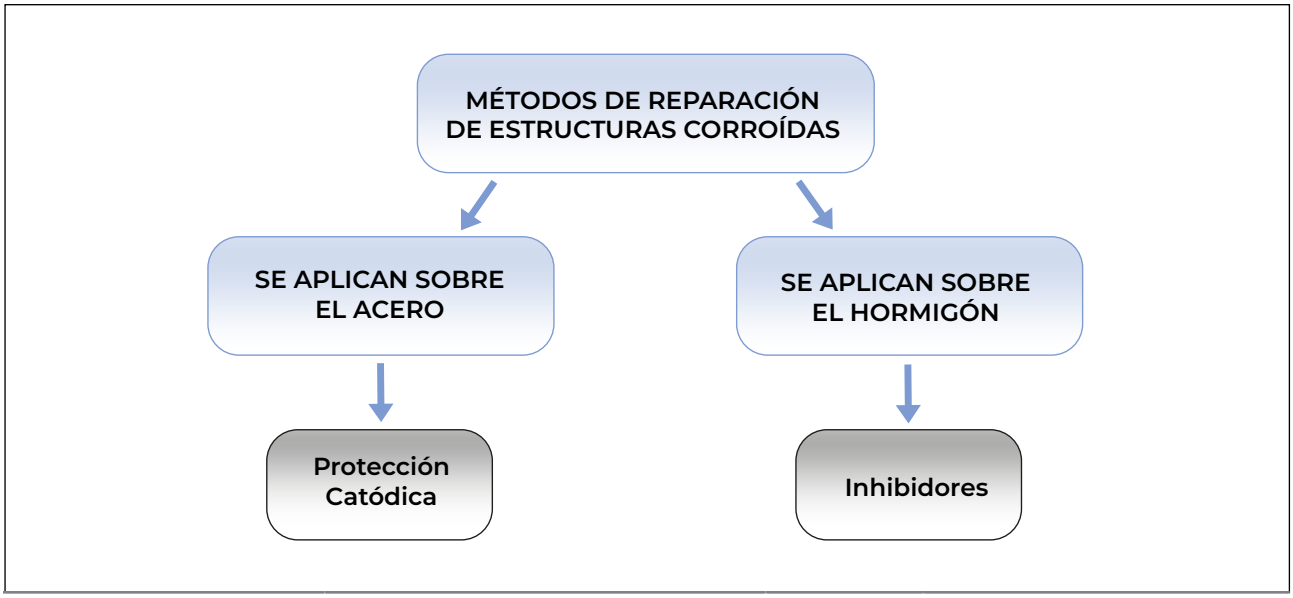
Tabla 2. Urgencia de intervención (años)

NIVEL DEL IC	ÍNDICE DE CORROSIÓN	URGENCIA DE INTERVENCIÓN
1	Despreciable	> 10
2	Medio	5 - 10
3	Severo	2 - 5
4	Muy severo	0 - 2

3. Métodos de reparación que aborda la presente Guía

Existen una serie de medidas o métodos que se utilizan para reparar estructuras dañadas. Estas medidas aportan una protección adicional al hormigón y pueden ser usadas y especificadas también en el momento del diseño de la estructura. En la presente Guía se explicarán de forma más detallada dos de ellas que son las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos de reparación que aborda la presente guía



TÉCNICA	FUNDAMENTOS	CAMPO APLICACIÓN
Protección catódica	Corriente que se aplica a la armadura y la polariza catódicamente lo que la hace inmune a la corrosión	· En estructuras existentes, la corriente y demás componentes de la técnica hay que adaptarlas a cada situación de corrosión y hormigón particular · En estructuras nuevas, la cantidad de corriente necesaria para polarizar es muy pequeña
Inhibidores de corrosión	Son sustancias que inhiben la corrosión o permiten un límite mayor de cloruros que desencadenan la corrosión	· Se aplican en la superficie del hormigón. Funcionan penetrando hasta la armadura cubriéndola con un film pasivante que la aísla del medio y la corrosión se detiene · También pueden producir una disminución de la entrada de cloruros y de la humedad · Se pueden añadir en el agua de amasado. Entonces, si son “anódicos” hay que añadir una dosis que prevea la cantidad máxima de cloruros que puede llegar a la armadura. Si son catódicos o mixtos, su concentración puede ser independiente de la concentración de cloruros

La protección catódica y los inhibidores de corrosión (estos últimos llamados “control de zonas anódicas”) en la norma UNE-EN 1504.

La conocida norma UNE-EN 1504 “Productos y sistemas para la reparación y protección de estructuras de hormigón” trata en su Parte 9 de los “Principios generales para el uso de productos y sistemas” . Entre estos principios, se encuentran los relativos a la corrosión de las armaduras, con sus correspondientes métodos. Así, en el apartado 6.2.3. se explicita: “cuando exista corrosión de la armadura o peligro de que pueda existir corrosión en un futuro, se deben elegir uno o varios de los principios de protección contra la corrosión y de reparación de la corrosión (Principios 7 a 11 de la Tabla 1)".

En concreto, el Principio 10 “Protección catódica” comprende como método, en 10.1, la aplicación de un potencial eléctrico y el Principio 11 “Control de zonas anódicas”, en 11.3, la aplicación de inhibidores de corrosión en o sobre el hormigón.

En consecuencia, aunque no se hayan desarrollado las Partes específicas en la norma, tanto el método de protección catódica como el que contempla el uso de inhibidores de corrosión están plenamente reconocidos como válidos en la misma.

4. Técnicas de reparación de la corrosión de armaduras

Protección catódica.

Introducción.

La técnica consiste en aplicar una corriente a la armadura metálica para que se comporte toda como cátodo suprimiendo los ánodos de su superficie y con ello protegiendo la armadura de forma indefinida. La corriente se puede aplicar (ver figura 5)

- o bien con un ánodo exterior que se llama “de sacrificio” porque se gasta (corroe).
- o bien aplicando una corriente continua de la adecuada polaridad (método de corriente impuesta).

La corriente hace que la armadura se polarice a un potencial de signo (convencional) negativo en el que no sufre corrosión.

Lo habitual es aplicar una corriente por lo que es necesario definir bien este parámetro, en función:

- del área de armadura o
- del área de hormigón

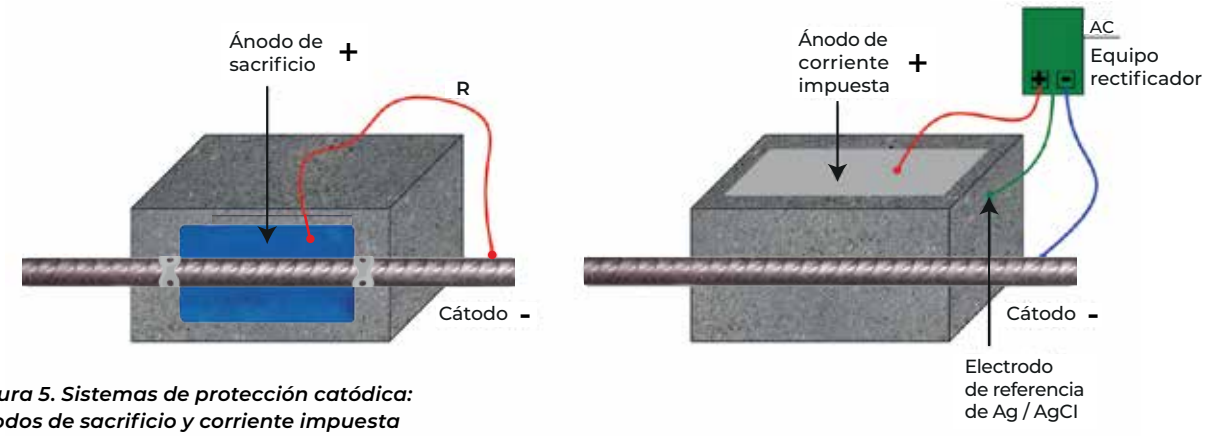


Figura 5. Sistemas de protección catódica: ánodos de sacrificio y corriente impuesta

El procedimiento actualmente más utilizado en las zonas aéreas de las estructuras es mediante corriente impuesta aplicada a través de una fuente de corriente continua, de forma que el polo positivo se conecta a un ánodo auxiliar llamado electrodo dispersor de corriente y el polo negativo se conecta a la armadura. Lo que se consigue es que sobre la armadura o cátodo tenga lugar la reacción:

$2H_2O+2O_2+4e^- \rightarrow 4OH^-$

y sobre el ánodo la reacción

$2H_2O+ 4e^- \rightarrow 4H^+ + O_2\uparrow$

y además en presencia de cloruros [1*]

$2Cl^- \rightarrow Cl_2+2e^-$

**: descripción a pie de página*

H hidrógeno
H2O agua
O2 oxígeno
e electrones
OH ión hidróxilo
Cl ión cloro
Cl2 gas cloro

Con las dos formas de PC (Protección Catódica): corriente impuesta (ICCP/Impressed Current Cathodic Protection) y ánodo de sacrificio o galvánico (SACP/Sacrificial Anode Cathodic Protection), cuando se diseñan, instalan y ponen en servicio correctamente, se ha demostrado que ambos sistemas controlan la corrosión al proporcionar una corriente eléctrica a una región afectada. El sistema de corriente impuesta (ICCP) utiliza una fuente de alimentación externa permanente, pero la PC "galvánica" o "ánodo de sacrificio" (SACP) se compone de metales diferentes acoplados en un entorno común para crear energía eléctrica similar a la de una celda de batería.

Tipos. Efectos en la armadura.

a) Ánodos galvánicos:

Uno de los principales beneficios de los SACP es que requieren muy poco mantenimiento o ajustes una vez instalados. Las conexiones de los ánodos quedan embebidas en el hormigón, evitando roturas accidentales o deliberadas en los cables. La ausencia de rectificadores para corriente impuesta evita daños en el sistema debido a rayos y vandalismo. El sistema es inmune a cortes o fallas de energía. Debido a los voltajes de activación relativamente bajos (diferencia entre los potenciales del ánodo y del acero) de los sistemas a base de ánodos de sacrificio, la sobreprotección, que puede conducir a la fragilización por hidrógeno y al agrietamiento por corrosión bajo tensión del acero pretensado, no es una preocupación tan seria como con los sistemas ICCP.

Los cortocircuitos tampoco son un problema, ya que la acción galvánica ocurre uniformemente a través de la superficie del ánodo, a diferencia de los sistemas de ICCP que pueden sufrir un cortocircuito por incrustaciones tales como barras de refuerzo altas, patas de sillas u otros desechos de acero extraños. Por lo tanto, la simplicidad de diseño y mantenimiento se considera una gran ventaja de los sistemas SACP. En un sistema SACP, la salida de corriente se autoajusta, dependiendo de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, de modo que esté funcionando bajo demanda y por lo tanto no sobreproteja.

b) Corriente Impuesta:

Uno de los principales beneficios de la ICCP es que es adecuada para proteger grandes superficies de infraestructuras. Este tipo de sistemas requieren, no obstante, de alimentación eléctrica constante para su correcto funcionamiento, y por tanto requieren de un mantenimiento preventivo constante (que puede ser incluso telegestionado).

La corriente alterna de alimentación del sistema se toma de la red eléctrica (monofásica o trifásica, 230, 380 V) y mediante un equipo transforrectificador (T/R) se rectifica a corriente continua y se inyecta a través de los ánodos de corriente impuesta.

Los ánodos, generalmente de titanio recubiertos con óxidos metales de metales nobles (Os-Ru-Ir...) son en general en forma de malla o varillas finas, y se instalan entre la armadura y la superficie de acabado. Se requiere por tanto una instalación antes de reparar definitivamente el hormigón.

Se requiere también la instalación de electrodos de referencia (Ag/AgCl) para el control del funcionamiento del transforrectificador en modo automático, pues las necesidades de inyección de corriente de protección pueden variar a lo largo del tiempo con la polarización de la estructura u otros factores externos como puede ser el ingreso de cloruros adicionales (por ejemplo, en puentes de viales a los que se aplica sal periódicamente para evitar el hielo en épocas invernales, entre otros).

Los sistemas por corriente impuesta (ICCP) son altamente recomendables en presencia de corrientes foráneas (erráticas por el terreno o el agua) afectantes: dinámicas o estáticas como las descritas con los sistemas por SACP. Deberá escogerse este sistema si se detectan tales afecciones, lo que requiere de un estudio detallado previo para su diseño, incluso con monitorizaciones de cambios de potencial en periodos de 24 h.

5. Medida de la eficacia de la reparación

La medida de la eficacia es necesario acometerla siempre antes de finalizar los trabajos de reparación. Existen métodos específicos para comprobar el buen funcionamiento de la protección catódica y es la medida de la velocidad de corrosión después de reparar la que se puede aplicar en todos los tipos de reparación.

5.1 Control de la eficacia de la protección catódica

La PC consiste en la aplicación de una corriente o de un potencial a la armadura. Esta corriente/potencial depende de la contaminación del hormigón, su humedad y la cantidad de armadura por lo que es necesario un proyecto específico para cada estructura o elemento.

La comprobación de haber alcanzado el objetivo del proyecto debe preverse en el propio proyecto de la reparación.

Las formas de controlarlo son varias y pueden aplicarse individual o simultáneamente midiendo:

1. La corriente que circula entre el contraelectrodo y la armadura para confirmar que es la definida en el proyecto.

La corriente es máxima al principio y, posteriormente

a. Se debe mantener si el método es mediante corriente impuesta, pero siempre teniendo en cuenta que va a variar dependiendo del grado de humedad del hormigón si este no es constante (por ejemplo, en hormigones expuestos a la lluvia). Los límites de variación de la corriente pueden establecerse después de unos meses de funcionamiento. Estos no tienen por qué ser los mismos en toda la estructura, sino que deben adecuarse a cada elemento.

b. Puede disminuir con el tiempo si la PC se aplica mediante ánodos de sacrificio y también variar con el grado de humedad. En este caso lo que debe establecerse es el valor mínimo en condiciones de humedad máxima, indicativo de la actividad del ánodo.

2. El potencial de la armadura mediante el embebido previo de un electrodo de referencia en el hormigón o colocándolo en su superficie. El potencial a alcanzar debe establecerse en el proyecto y puede comprobarse mediante desconexión temporal del sistema (potencial-off). Este potencial "de protección" varía en función de las características de la estructura a proteger, generalmente se recomienda entre -700 y -900 mV (Electrodo de Calomelanos Saturado, ECS).

En la figura 6 se muestra lo que sucede en el potencial al desconectar la corriente:

a. El potencial antes de aplicar la PC se llama $E_{corr,}1$ en la figura.

b. Al conectar la corriente pasa al potencial-ON (E_{on}).

c. Cuando se desconecta la corriente, el potencial inmediatamente pasa al valor E_{off} que permite saber cuál es la resistencia eléctrica (caída óhmica) del circuito.

d. Al cabo de unas horas el potencial se despolariza y llega al valor $E_{corr,2}$ en la figura, que sería el potencial espontaneo o de corrosión después de aplicar la protección catódica.

El valor de -700 a -900 mV (ECS) se aplica al potencial-OFF.

Si el criterio es el valor del potencial de corrosión ($E_{corr,2}$) al despolarizar, existen dos posibilidades:

1. Que la diferencia sea de 100 mV más anódico que el potencial -OFF al cabo de 24 horas o
2. Que sea de 150 mV al cabo de más de 24 horas.

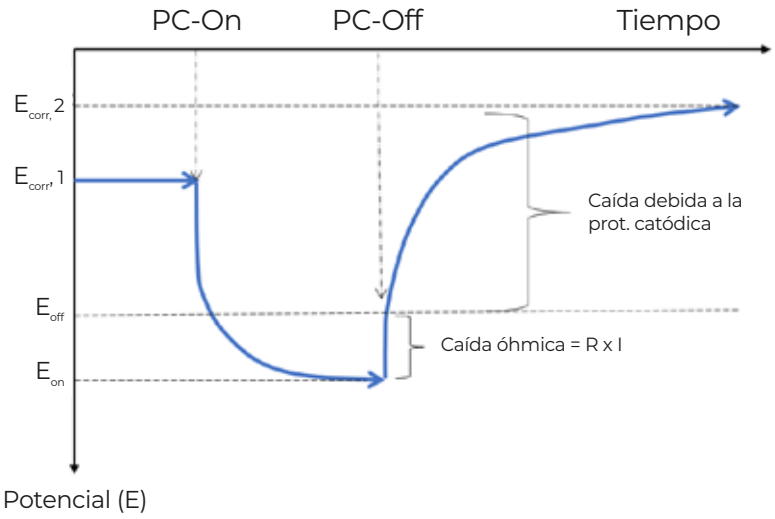


Figura 6. Evolución del potencial antes, durante y después de aplicar la protección catódica. El $E_{corr,1}$ es el potencial antes de aplicar al PC. El E_{on} es durante la aplicación de la corriente. El E_{off} es justo una fracción de segundo después de desconectar la corriente y el $E_{corr,2}$ es el potencial despolarizado, que debe ser más positivo que el de antes de aplicar la corriente

5.2. Medida de la PVT (Passivation Verification Technique).

Existe un método de verificación de la protección catódica sin desconectar la corriente que se llama "Passivation Verification Technique" (PVT) que consiste en aplicar una señal en corriente alterna (medida de la Impedancia electroquímica) y comprobar el ángulo de desfase de la corriente. Si este ángulo tiene unos determinados valores pequeños a las frecuencias bajas es porque el ánodo está activo. La técnica indica si la armadura está BIEN Protegida, tiene Protección MODERADA o queda NO protegida.

5.3. Medida de la velocidad de corrosión

La corrosión se puede medir como velocidad (pérdida de masa por área y tiempo y se denomina como I_{corr} o V_{corr}) o como penetración de la corrosión (pérdida del diámetro o del área de la barra) es decir corrosión acumulada (P_{corr} en la figura 7).

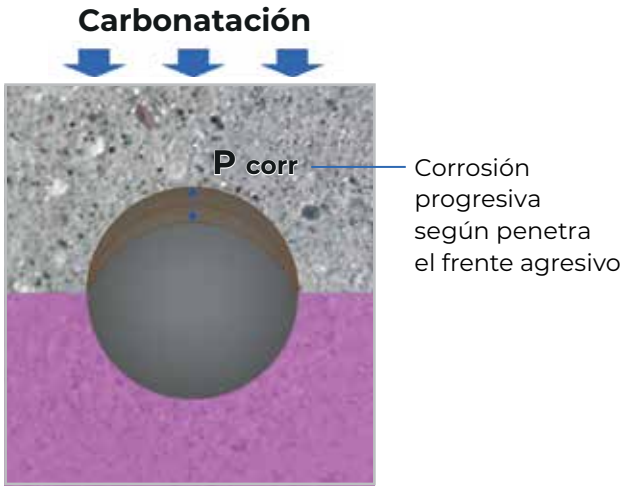


Figura 7. La corrosión empieza en la zona más próxima a la superficie y progresa según el frente agresivo va ingresando más. Ello hace que la corrosión vaya aumentando y el diámetro de la barra disminuyendo



Figura 8. Medida del diámetro de la barra con un calibre

La velocidad instantánea es la que se puede medir mediante técnicas electroquímicas (corrosímetro portátil) y la penetración del ataque se mide con un calibre. La relación entre la velocidad instantánea y la acumulada (P_{corr}), como indica la expresión, aparece al multiplicar la primera por el tiempo (t) supuesto que la I_{corr} es constante:

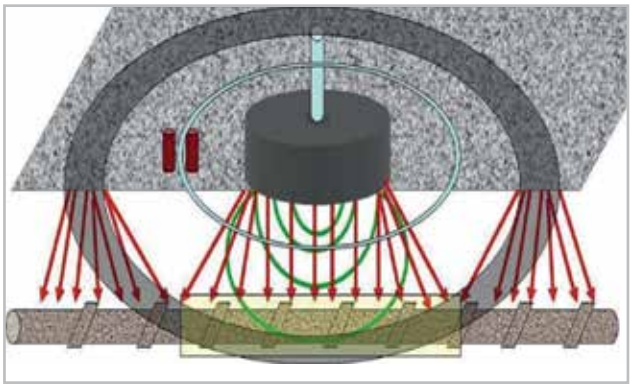
$$P_{corr} = I_{corr} \cdot t$$

La relación entre I_{corr} en µA/cm² y la V_{corr} en µm/año resulta ser:

$$V_{corr}\left[\mu \frac{m}{año}\right] = I_{corr}\left[\mu \frac{A}{cm^2}\right] \cdot 11{,}6$$

La velocidad instantánea de corrosión se puede medir con un corrosímetro portátil, como el que se muestra en la figura 9. El corrosímetro mide a través de una sonda, que tiene un anillo de guarda para confinar la corriente, que se aplica en una zona delimitada eléctricamente por el anillo, como se muestra en la parte derecha de la figura. Entre la sonda y el hormigón se coloca una esponja humedecida para facilitar el contacto mediante la humectación superficial. El otro terminal del corrosímetro se conecta a la armadura.





Figuras 9 y 10. Corrosímetro y esquema del confinamiento de la corriente que aplica la sonda

Las velocidades de corrosión que se pueden medir están clasificadas en cuatro o cinco niveles (Referencia a la Recomendación Rilem y Alconpat) que se indican en la Tabla 4[2].

Cuando la armadura está corroyéndose, los valores de velocidad de corrosión son mayores de 0.1-0,2 µA/cm² y cuando se repara deben bajar a valores menores que ese límite.

Esta medida se aplica en el caso de los inhibidores de corrosión para comprobar que la corrosión se para y desciende a valores despreciables. En el caso de la protección catódica igualmente se puede medir la velocidad de corrosión después de 24 h de haber desconectado la corriente para comprobar que los valores son bajos, indicativos de repasivación.

Tabla 4. Urgencia de intervención (años)

NIVEL DE CORROSIÓN	I_{corr} (µA/cm²)	V_{corr} (µm/year)	SITUACIÓN DE LA ARMADURA
Despreciable	< 0.1	> 1	Sin corrosión. Estado pasivo
Bajo	0.1 - 0.5	1 - 5	Despasivada pero con humedad baja en el hormigón
Moderado	0.5 - 1	5 - 10	Corrosión activa con humedad mayor
Alto	> 1	> 10	Corrosión importante. Hormigón húmedo
Muy Alto	> 10	> 100	Corrosión muy elevada en presencia de cloruros o ácidos. Hormigón muy húmedo

[2] Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland Ø, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B. (2004). "RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion.
Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method." Materials & Structures **37** (273): 623-643.

6. Ánodos de sacrificio

Introducción.

Para proteger estructuras de hormigón armado, se pueden utilizar técnicas electroquímicas para parar la corrosión, prevenirla o contenerla dentro de límites aceptables. Para ello es necesario polarizar catódicamente las armaduras; esto, en el caso de protección / prevención catódica galvánica, puede lograrse acoplando ánodos o bandas de sacrificio de zinc que, gracias a su potencial más negativo, protegen las armaduras de acero evitando su corrosión.

El propósito de la protección es llevar las armaduras al campo pasivo o reducir la actividad en su superficie. En el caso de estructuras contaminadas por cloruros, la corriente también provoca un aumento del pH y la eliminación de los propios cloruros de las barras, favoreciendo estos dos fenómenos la formación de la película pasiva sobre las mismas. En el caso del hormigón carbonatado, en cambio, la corriente simplemente causa el aumento de pH que se puede llevar de menos de 9 (estado de carbonatación) a 12-13, valores que permiten el paso de las armaduras desde un estado de actividad a otro de pasividad.

La prevención catódica se basa en el hecho de que la corrosión en la armadura no se desencadenará siempre que su potencial se mantenga por debajo del potencial de corrosión. Mediante el acoplamiento de los dos metales (acero al carbono-zinc), las armaduras se pueden mantener pasivas, evitando el inicio del fenómeno incluso en el caso de niveles altos de cloruro.

6.1. Normativas

UNE-EN ISO 12696 (2017). Protección catódica de acero en el hormigón (ISO 12696:2016).

- aplica a la protección catódica del acero en el hormigón expuesto a la atmósfera, enterrado o sumergido. No es un código de diseño, sino una norma para el diseño y control de la efectividad de funcionamiento de la protección catódica.
- especifica los requisitos precisos para la eficacia de la protección catódica del acero en hormigón, tanto para las estructuras nuevas como para las ya existentes. Se puede aplicar a estructuras de edificación e ingeniería civil, incluyendo armaduras normales y armaduras pretensadas embebidas en el hormigón. Es aplicable a armaduras de acero sin recubrir y a armaduras de acero revestidas por un recubrimiento orgánico.

6.2. Características de los sistemas

MAPEI ha desarrollado una gama de productos destinados a la protección y prevención catódica galvánica del acero, entre los que se encuentran:

- Sistema interno a los elementos de hormigón Mapeshield I.
- Sistema externo a los elementos de hormigón Mapeshield E.

Sistema interno MAPESHIELD I:

Constituido por cuatro tipos diferentes de ánodos galvánicos internos, que se diferencian entre sí en el tamaño y en la masa de zinc contenida, para poder garantizar la protección a la mayoría de estructuras de hormigón armado.

Los ánodos Mapeshield I están compuestos por un núcleo de zinc de gran superficie, cubierto con una pasta conductora que se mantiene activa en el tiempo. Después de unir Mapeshield I a las barras de armadura mediante conexiones metálicas, se genera una diferencia de potencial entre el acero y el zinc que bloquea el proceso corrosivo y previene su formación, incluso cuando el entorno circundante es particularmente agresivo debido a la presencia de, por ejemplo, cloruros.

Mapeshield I se suministra en 2 longitudes y 4 masas diferentes, lo que hace posible su aplicación en la mayoría de las instalaciones. La superficie que el ánodo es capaz de proteger se basa en su tamaño (cuanto más grande es, más amplia es el área protegida), mientras que de la masa depende la duración, ya que esta es proporcional a la cantidad de metal contenido.

Los ánodos MAPESHIELD I aseguran una despolarización del acero de las armaduras de acuerdo con las disposiciones de la norma europea EN 12696 “Protección catódica de acero en hormigón".

Sistema interno MAPESHIELD E:

Constituido por láminas de zinc autoadhesivas para aplicar directamente sobre la superficie del hormigón.

Además de su sencilla aplicación, este tipo de ánodo galvánico permite la protección de las armaduras sin romper el hormigón, dondequiera que esto no fuera necesario. De esta forma es posible un ahorro de tiempo y dinero considerable.

Mapeshield E se compone de una lámina de zinc puro al 99,9% de 250 µm, junto con un gel adhesivo que también es un excelente conductor iónico. Una vez conectado Mapeshield E a las barras de armadura mediante conexiones metálicas, se genera una diferencia de potencial entre el acero y el zinc que bloquea el proceso corrosivo y previene su formación, incluso cuando el entorno circundante es particularmente agresivo debido, por ejemplo, a la presencia de cloruros. La alta conductividad de la lámina de zinc asegura una distribución uniforme de la corriente de protección catódica y facilita el cumplimiento de los requisitos exigidos en este sentido.

MAPESHIELD E asegura una despolarización del acero de armadura de acuerdo con las disposiciones de la norma europea EN 12696 “Protección catódica de acero en hormigón"



Figura 11. Sistema de ánodo externo Mapeshield E25

6.3. Fases de puesta en obra

6.3.1. Sistema de ánodos internos MAPESHIELD I

Cabe distinguir entre:

- estructuras que necesiten ser reparadas.
- estructuras de nueva construcción.

6.3.1.1. Protección catódica galvánica en estructuras que necesiten ser reparadas.

Preparación del soporte

El soporte debe prepararse adecuadamente, eliminando el hormigón deteriorado y en fase de desprendimiento, y, si fuera necesario, incluso por debajo de la armadura hasta llegar a un soporte sólido, resistente y rugoso. Deberán eliminarse los eventuales tratamientos previos de reparación que no estén perfectamente adheridos. Se eliminará de la armadura expuesta todo resto de óxido, para garantizar un buen contacto entre el acero y el mortero u hormigón de reparación. Antes de instalar el ánodo de zinc MAPESHIELD I, se debe verificar la continuidad eléctrica de la armadura con ayuda de un “tester”.

Cuando esté previsto el uso de MAPESHIELD I, no aplicar ningún otro tratamiento antióxido sobre los hierros de la armadura antes de proceder a su reparación, ya que serían una barrera para la protección catódica galvánica.

Aplicación de MAPESHIELD I

Los ánodos deben colocarse y fijarse a las barras de la armadura de modo que queden bien sujetos y no puedan moverse durante las operaciones de reparación. Deberán fijarse a los hierros con las conexiones metálicas, de las que está provisto el ánodo, mediante alambre o soldadura. Es necesario asegurarse de que debajo del ánodo queda suficiente espacio para que penetre el mortero durante la fase de aplicación; dicho espacio nunca podrá ser inferior a 2-3 veces la dimensión máxima del árido presente en el mortero de reparación. Una vez colocados, deberá comprobarse la continuidad eléctrica real entre los ánodos y las barras de la armadura.



Figura 12.
Colocación de MAPESHIELD I

Aplicación del mortero de reparación

La reparación de las estructuras que han sido protegidas con MAPESHIELD I debe llevarse a cabo con un mortero adecuado. La resistividad eléctrica del mortero de reparación debe estar comprendida en un rango de entre el 50% y el 200% de la del hormigón original, hasta un máximo de 100 kΩ, de acuerdo con lo establecido en la EN 12696.

Los morteros de la línea MAPEGROUT cumplen los requisitos y están recomendados para la reparación de estructuras protegidas con sistemas catódicos galvánicos.

Ejecutar la reparación de acuerdo con los procedimientos de aplicación habituales, consultando para ello la ficha técnica correspondiente al producto elegido para la reparación. Asegurarse de no dejar huecos alrededor de los ánodos.



Figura 13. Proyección de mortero MAPEGROUT con los ánodos MAPESHIELD I ya colocados en las armaduras



Figura 14. Relleno por proyección de mortero MAPEGROUT

6.3.1.2. Protección catódica galvánica en estructuras de nueva construcción.

Aplicación de MAPESHIELD I

MAPESHIELD I puede ser utilizado en la construcción de nuevas estructuras incluso si estas se realizan en ambientes particularmente agresivos. Antes de hormigonar, los ánodos deben colocarse y sujetarse a las barras de armadura con las conexiones metálicas de las que están provistos, atándolos con un alambre metálico. Una vez que se hayan instalado, se deberá verificar que los ánodos estén firmemente fijados a la armadura, para que no se muevan ni se desprendan durante el hormigonado.





Figuras 15 y 16. Detalles de la colocación de MAPESHIELD I en el armado y posterior vertido de mortero MAPEGROUT

Control de funcionamiento

Para poder realizar el control del sistema es necesario, en el momento del vertido o de la reparación, insertar uno o más electrodos de referencia (habitualmente electrodos Ag/AgCl), en la zona protegida por los ánodos que se desee controlar.

Para ello, uno o más ánodos, elegidos en zonas que puedan considerarse significativas, se conectarán a uno o más cables eléctricos provistos de un interruptor “on/off”, que se derivarán hasta una caja de conexiones junto con los de los electrodos de referencia.



Figura 17. Detalle de la conexión a uno de los ánodos MAPESHIELD I

6.3.2. Sistema de ánodos externos MAPESHIELD E

Uso previsto en estructuras a reparar.

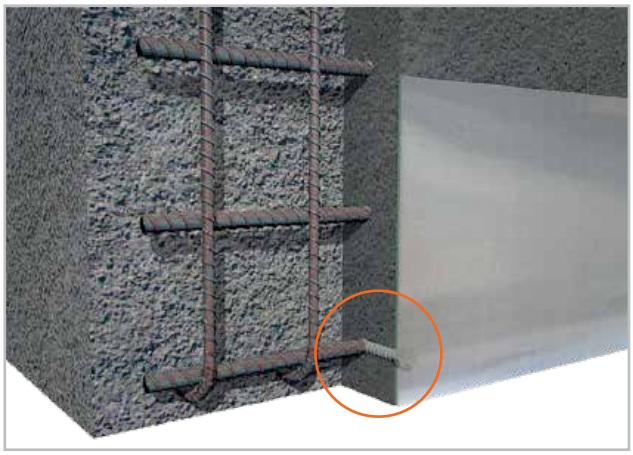


Figura 18. Aspecto de la superficie rugosa de hormigón preparada y de la fijación mecánica de las conexiones a la armadura

La instalación se lleva a cabo con la siguiente secuencia:

- **a.** comprobación de la accesibilidad de las instalaciones y toma de medidas apropiadas si fuera necesario;
- **b.** preparación de la superficie del hormigón;
- **c.** localización de la armadura;
- **d**. fijación mecánica de las conexiones a la armadura;
- **e.** control de la continuidad eléctrica de la armadura;
- **f.** aplicación del mortero de reparación;
- **g.** aplicación de la lámina en la superficie restaurada;
- **h.** conexión eléctrica entre la armadura y la lámina de zinc;
- **i.** control de la resistencia de las conexiones eléctricas;
- **j.** control de la polarización de la armadura;
- **k.** enlucido y regularización de las áreas protegidas.

A continuación, se describe en detalle cada paso del proceso de instalación.

b. Preparación de la superficie del hormigón

El sustrato debe ser preparado como en una reparación normal. Quitar el hormigón deteriorado o en fase de desprendimiento, si fuera necesario incluso por debajo de la armadura, hasta que el sustrato sea sólido, fuerte y rugoso. Cualquier trabajo de reparación anterior que no esté perfectamente adherido debe ser eliminado. Limpiar el hormigón y las barras de la armadura hasta que queden libres de polvo, óxido, lechada de cemento, grasa, aceite, barniz o pintura vieja, utilizando chorro de arena (en el caso de pintura u otros materiales aislantes). Es importante que los hierros se limpien cuidadosamente y se lleven a metal brillante en el área de conexión eléctrica con el ánodo laminar. Es necesario, antes de la instalación, verificar la continuidad de la armadura con un ohmímetro (una resistencia ≤ 1 ohm es aceptable). En el caso de que no se confirmara la continuidad, es necesario restablecerla donde fuere interrumpida, mediante una soldadura simple.

c. Localización de la armadura

Si no hubiera sido descubierta por la operación previa de preparación de la superficie, el mejor método y

más sencillo para ubicar la armadura es el uso de un localizador de armaduras, que identifica con precisión las barras de armadura y los alambres de las mallas electrosoldadas. Algunos localizadores de armaduras también pueden medir el espesor de recubrimiento de hormigón.

d. Fijación mecánica de las conexiones a la armadura

Después de localizar los hierros de la armadura, se marcan sus ubicaciones. Las conexiones con la armadura se pueden hacer como se describe en la siguiente imagen:

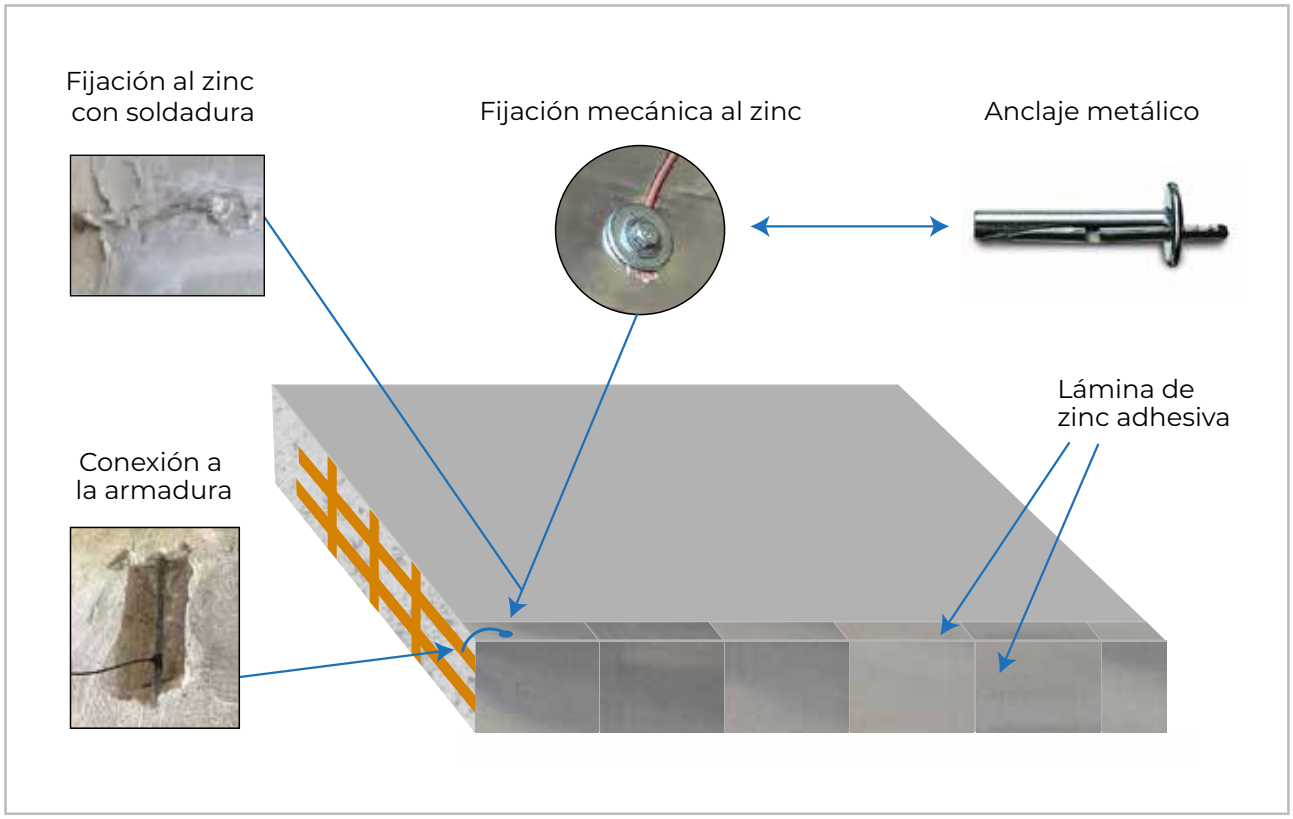


Figura 19. Detalle de la ejecución de las conexiones

Las conexiones eléctricas a la armadura deben ser suficiente largas para permanecer fuera del espesor de recuperación, a fin de poder conectarse a la lámina de zinc después de que la misma se haya aplicado.

En la superficie a restaurar, prever una conexión metálica a las barras de armadura, centrada, en cada elemento individual de la estructura y, en todo caso, no menos de dos conexiones en cada elemento de estructura a proteger. La conexión se realizará mediante cable conductor o directamente soldando una varilla roscada galvanizada a la armadura. En general, el número correcto de conexiones a la armadura debe establecerse directamente en la obra sobre la base de la información recogida “in situ”.

En estructuras nuevas o que no necesiten ser reparadas, prever sobre la superficie de la estructura uno o más puntos para la conexión de las barras de la armadura a los ánodos, a realizar con un simple cable eléctrico; en estas zonas, liberar de hormigón una pequeña porción de los hierros para permitir la fijación del cable.

Cada uno de los elementos estructurales (columna, viga, etc.) deberá contar al menos con una conexión.

e. Control de la continuidad eléctrica de la armadura

Una vez que se haya ejecutado satisfactoriamente la conexión metálica, comprobar la continuidad eléctrica de la armadura, con un multímetro digital. El contacto se lleva a cabo usando las denominadas pinzas de

cocodrilo. Llevar el mando central del multímetro en la posición “resistencia (Ω)” y medir la resistencia. Existe continuidad si la resistencia, en corriente continua, es inferior a 1 Ω.



Figura 20. Detalle del contacto con la armadura para la comprobación de la continuidad eléctrica con multímetro digital

f. Aplicación del mortero de reparación

La resistividad eléctrica del mortero de reparación debe estar en un rango comprendido entre el 50% y el 200% de la del hormigón original, hasta un máximo de 100 kΩ, de acuerdo con las disposiciones de la norma EN 12696. Los morteros de la línea MAPEGROUT y PLANITOP cumplen los requisitos exigidos y están indicados para la reparación de estructuras protegidas con sistemas catódicos galvánicos. Se desaconsejan todos los productos que contengan una cantidad significativa de polímeros. No aplicar ningún recubrimiento a las barras de armadura, ya que deben quedar absolutamente libres de cualquier cubertura que pudiera aislar e invalidar el sistema de protección. No utilizar para la recuperación mortero epoxi o de poliuretano. Efectuar la recuperación completa siguiendo los procedimientos normales de aplicación, según las indicaciones de las Fichas Técnicas, prestando especial atención al acabado de la superficie, que deberá ser lo más regular posible para evitar discontinuidades, resaltos o aristas cerradas que harían difícil la aplicación de una manera continua de la hoja de zinc autoadhesiva.

g. Aplicación de la lámina en la superficie restaurada

Después de cortar MAPESHIELD E25 en la longitud apropiada, se puede aplicar sobre la superficie del hormigón por presión manual después de quitar del reverso de la lámina, la película de silicona protectora del gel conductor iónico.

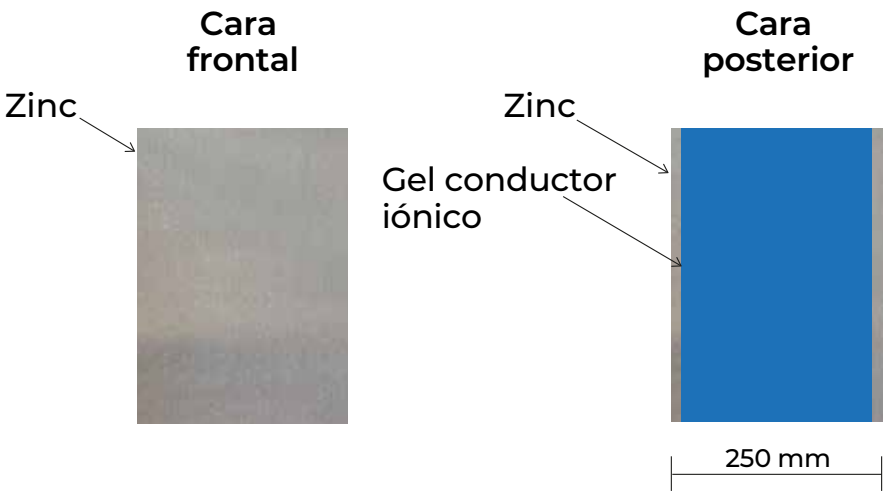


Figura 21. Composición de la lámina MAPESHIELD E25

Es importante que la lámina se aplique en la superficie del mortero completamente seca. Posibles aplicaciones sobre partes de producto todavía frescas perjudican el poder adhesivo del gel conductor iónico.





Figuras 22, 23 y 24. Proceso de preparación de la colocación de MAPESHIELD E25

Colocar la lámina en la superficie eliminando la película protectora del gel conductor. Presionar la lámina contra el soporte para que se adhiera perfectamente al mismo. Aplicar la hoja de zinc a lo largo de la estructura a proteger, asegurándose de que no queden huecos, que podrían suponer puntos débiles en el sistema. Presionar la lámina sobre la superficie con la ayuda de una maza de goma o herramienta similar, para asegurar un buen agarre.




Figuras 25 y 26. Maza de golpeo para asegurar el agarre de MAPESHIELD E25

Para sellar las secciones superpuestas de la lámina, usar anclajes de plástico de cabeza ancha a intervalos regulares de 1 metro. En cualquier caso, para cada unión que se requiera, es necesaria la presencia de 1 clavo de expansión metálico con el fin de garantizar la continuidad metálica entre las mismas, como se describe a continuación:

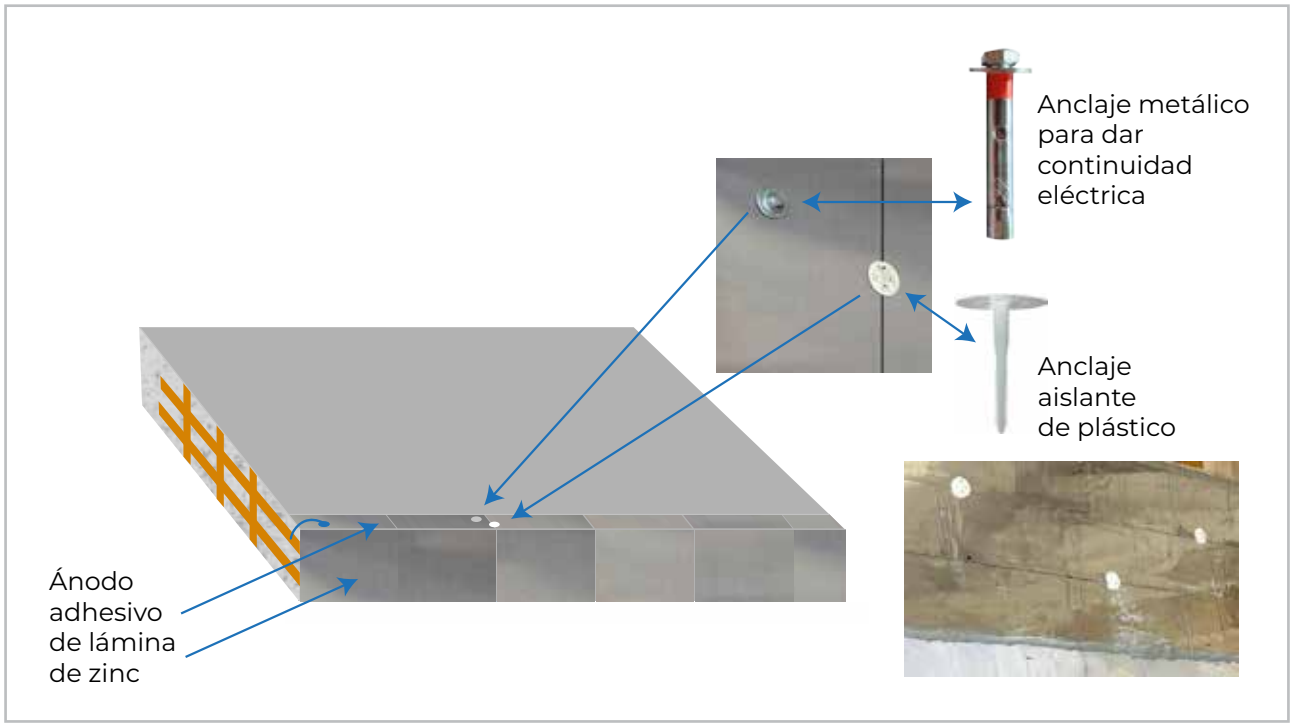


Figura 27. Elementos de unión

En el caso de que la lámina sea aplicada sobre superficies horizontales bajo techo, tales como forjados u otras, por razones de seguridad debe hacerse una fijación adicional con clavos de expansión para garantizar un anclaje perfecto con garantía absoluta de que sea imposible el desprendimiento.

g.1. Sellado externo de las láminas

Una vez colocado el ánodo es necesario sellarlo en las zonas terminales expuestas y en los encuentros con MAPEFLEX PU40 o MAPEFLEX PU 45 FT, previo tratamiento de los bordes con PRIMER M, para evitar la penetración de agua entre la lámina y el soporte. Posteriormente, la estructura puede ser impermeabilizada y regularizada con un recubrimiento adecuado.

g.2. Precauciones a tomar durante y después de la puesta en obra

No debe tomarse ninguna precaución especial con temperaturas comprendidas entre +5 °C y +35 °C. Se recomienda emplear un sistema de impermeabilización válido en las zonas expuestas al agua (embarcaderos, frentes, etc.).

h. Conexión eléctrica entre la armadura y la lámina de zinc

Cada hoja no interconectada con otras hojas tendrá su propia conexión independiente a la armadura o, alternativamente, debe crearse una conexión entre las láminas. Para la conexión con la placa de zinc de los cables eléctricos previamente preparados y mantenidos fuera del espesor de la recuperación, utilizar uno de los métodos siguientes:

- un equipo de montaje a presión. Una perforación preliminar del recubrimiento de hormigón mejorará el uso de este tipo de equipo;





Figuras 28,29 y 30. Elementos para la conexión con la placa de zinc de los cables eléctricos

- tornillos de anclaje (tornillos autorroscantes), que se pueden introducir directamente en el hormigón. Asegurarse de realizar un agujero preliminar con una broca del taladro de diámetro apropiado;
- el uso de un berbiquí para tornillos;
- por medio de soldadura, soldando la capa de zinc directamente a una tuerca o a una arandela con el uso de una herramienta de soldadura accionada por batería o por gas;
- fijación de un taco en el extremo del alambre, fijado en el zinc utilizando un clavo de expansión metálico (solución recomendada);
- por cualquier otro sistema de fijación, que pueda asegurar un contacto estable y duradero en el tiempo.

i. Control de la resistencia de las conexiones eléctricas

Cada conexión eléctrica con MAPESHIELD E25 se controla directamente por contacto sobre las conexiones; la comprobación se realiza mediante el establecimiento de un contacto directo con la capa de zinc y su conexión.



Figura 31. Control de la resistencia de las conexiones eléctricas

j. Control de la polarización de la armadura

Se puede evaluar la funcionalidad de un sistema mediante inspección periódica (que debe evaluarse en función del tipo de aplicación y la forma de la estructura). Se realiza a través de electrodos de referencia adecuados para hormigón. Para un almacenamiento adecuado de los datos y su interpretación, véase el apartado 8.6 de la norma ISO 12696.



Figura 32. Electrodo de referencia

k. Enlucido y regularización de las áreas protegidas

Aplicación de dos capas de mortero de la gama MAPELASTIC, morteros cementosos impermeabilizantes de protección, a mano o usando una máquina de proyectar equipada con una boquilla para enlucidos. Para aumentar la capacidad uniformadora de los productos de la línea MAPELASTIC aplicados sobre la lámina de zinc, se recomienda interponer entre la primera y la segunda capa del producto, MAPENET 150, malla de refuerzo de fibra de vidrio resistente a los álcalis. Los productos cumplen con los requisitos definidos por la norma EN 1504-2 como recubrimientos (C). Si se desea pintar la superficie, se puede utilizar ELASTOCOLOR PITTURA, pintura elástica de protección y decoración a base de resinas acrílicas en dispersión acuosa.



Figura 33. Revestimiento protector MAPELASTIC GUARD (llana) / MAPELASTIC SMART (rodillo)

6.3.3. Ejemplos

Ejemplo 3: aplicación ánodos internos.

Obra: **rehabilitación de estructura en túnel ferroviario en El Garraf, Barcelona (2019-2020).**

Descripción: obra de rehabilitación estructural con elevada concentración de cloruros que en ciertos elementos (pilares y jácenas) llegaban a alcanzar el núcleo, provocando la corrosión y expansión de las armaduras lo cual ponía la estructura en riesgo. En este caso las nuevas armaduras fueron protegidas con ánodos de sacrificio internos, Mapeshield I, que luego quedarían embebidos en la masa del mortero de reparación. Cada ánodo utilizado contiene 245 g de zinc puro lo que a la armadura nueva, viene a suponer una protección de unos 40 años.

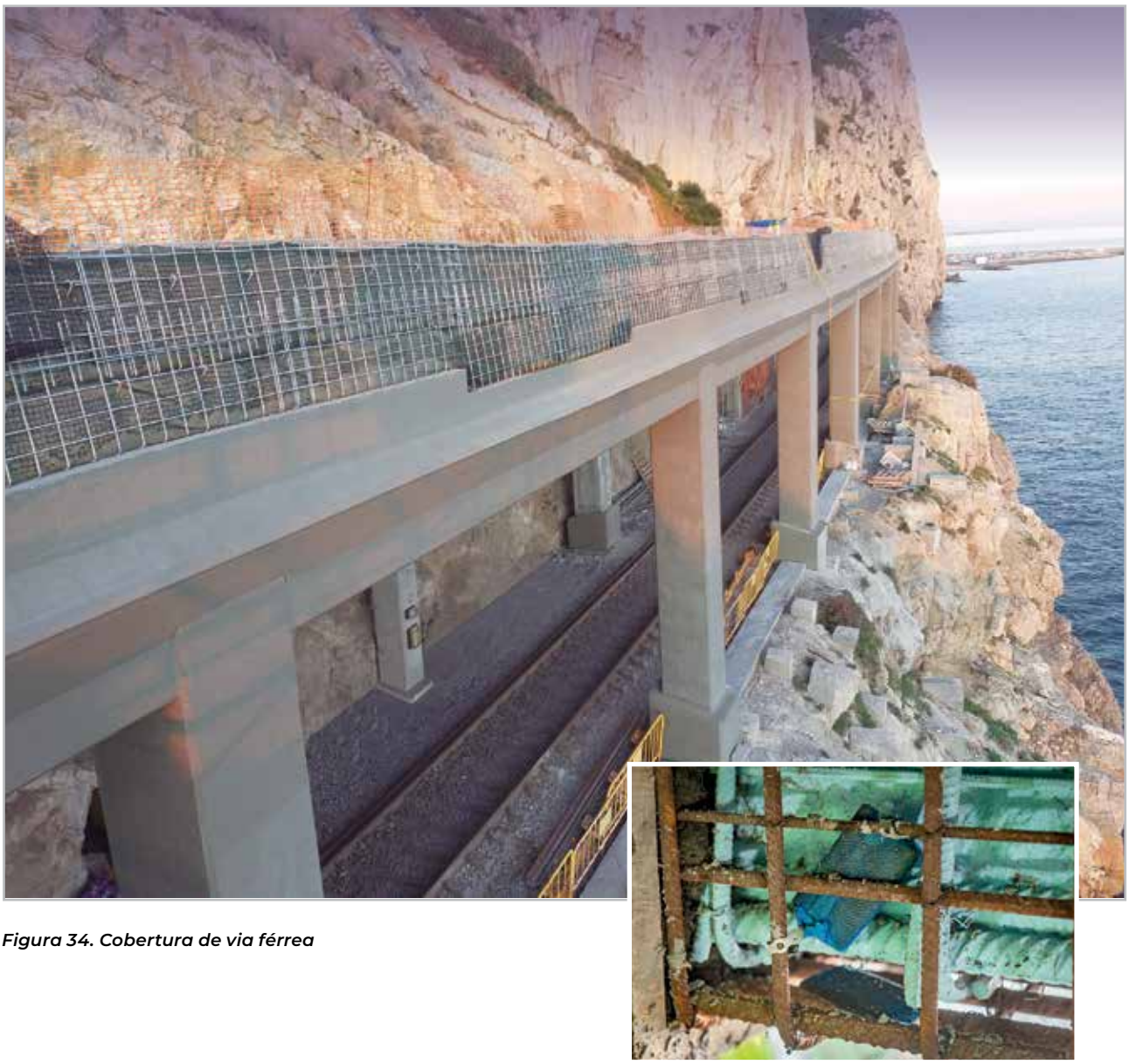


Figura 34. Cobertura de via férrea

Ejemplo 3: aplicación ánodos externos.

Obra: **reparación de juntas de viaducto en autopista (2015).**

Descripción: debido al uso continuado de sales en las campañas invernales provocando el deterioro, por corrosión de la estructura, se procede a la intervención mediante la aplicación de MAPESHIELD E en el intradós de las juntas del viaducto (partiendo del estado inicial, reparación con mortero sulfo-resistente proyectado, aplicación de la protección catódica, revestimiento posterior con mortero cementoso elástico y acabado final con pintura anti carbonatación).

Las siguientes imágenes muestran las diferentes fases de la intervención:





Figuras 35 y 36. Aplicación de Mapeshield E25 y acabado final

6.4. Métodos de verificación de la eficacia

El procedimiento de control, descrito en la EN 12696 y comentado anteriormente, establece:

- una despolarización, dentro de las 24 horas posteriores a la desconexión, de al menos 100 mV respecto al valor de potencial medido entre 0,1 s y 1 s después de la desconexión del ánodo ("instant off");
- una despolarización durante un largo periodo (> 24 horas) de al menos 150 mV después del apagado instantáneo ("instant off").

También se puede comprobar la eficacia midiendo la velocidad de corrosión. Si se desconectan los ánodos, a las 24 horas la I_{corr} debe ser menor de 0,1-0.2 μA/cm^2. Si los ánodos están conectados, al contrario, la corrosión debe ser mayor de 1 μA/cm^2 lo que indicaría la actividad del ánodo.

Sin desconectar los ánodos se puede verificar con la técnica PVT antes descrita.

6.5. Mantenimiento

El sistema de protección catódica galvánica interno no necesita mantenimiento alguno.

En el sistema de protección catódica galvánica externo, deberá comprobarse el estado de los revestimientos y recubrimientos de acabado y protección en función de la agresividad del medio al que estén expuestos. Como período medio orientativo puede estimarse un control visual cada 10 años. En caso de apreciarse un deterioro de dichos revestimientos y recubrimientos de acabado y protección que pudiera afectar a su funcionalidad (p. ej.: delaminación, fisuración), recomendamos consultar al fabricante para establecer el método de reparación / restauración / reposición más adecuada.

6.6. Especificaciones de proyecto

En general, según el apartado 4.3 de la norma UNE-EN ISO12696:2016, las instalaciones de protección catódica para aceros en hormigón deben ser objeto de un diseño detallado, que debe incluir, como mínimo:

- cálculos detallados.
- planos detallados de la instalación.
- especificaciones detalladas del material y equipos de la instalación.
- instrucciones o especificaciones detalladas de instalación, de los ensayos, de la puesta en tensión, de la puesta en servicio y del funcionamiento.
- evaluación de las estructuras que contienen pretensado por su susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno y por el riesgo de corrientes erráticas.

El Anexo B de dicha norma enumera los elementos que se deben considerar en el diseño detallado.

La vida útil de los ánodos para el sistema SACP está determinada por varios factores que pueden modificarse con el tiempo. La relación entre la corriente anódica para el consumo del ánodo y la velocidad de corrosión expresada como pérdida de masa en el tiempo se puede obtener de la primera ley de Faraday. Por ejemplo, por 1 Amp que pasa durante un año, se sacrificarán alrededor de 11,2 kg de ánodo de zinc. Entonces, el peso necesario del material del ánodo, que incluye los factores de eficiencia y utilización, se calcula utilizando esta ley de acuerdo con la ecuación (2):

$$W = (ARC * CR * L) / (E * U) \qquad (2)$$

donde ARC es la corriente promedio requerida, CR es la tasa de consumo del ánodo, L es la vida útil diseñada, E es la eficiencia y U es el factor de utilización del ánodo usado.

En el caso particular de protección catódica galvánica con productos Mapeshield, el Proyecto debe tener en consideración la información específica que sigue a continuación.

6.6.1. Consumo de los ánodos Mapeshield.

Protección catódica galvánica en estructuras ya degradadas

El consumo teórico de zinc en la protección catódica es de unos 12 kg/A•año (kg por amperio por año). Con base en estos datos y asumiendo el valor de la corriente suministrada en el primer año 20 mA y en los años siguientes 5 mA (segunda columna de la tabla), podemos calcular la duración de una determinada masa de zinc utilizada para proteger la estructura de la corrosión.

La primera columna de la tabla indica los años de vida del ánodo, la tercera el peso progresivo de zinc a lo largo del tiempo, la cuarta la pérdida de peso anual calculada en función de consumo teórico (12 kg/A•año) y de la corriente suministrada, que es por tanto de 220 g el primer año y de unos 60 g en los años siguientes. De esta forma podemos calcular que una masa de 1.350 g de zinc utilizada para la protección catódica galvánica puede durar 20 años antes de agotarse.

Tabla 5. Consumo estimado de MAPESHIELD I en estructuras degradadas

DURACIÓN AÑOS	CORRIENTE mAmps	Q.TA' Zn / Mq g	PÉRDIDA PESO g / Año	PESO RESIDUO g
1	20	1350	-220	1130
2	5	1130	-50	1130
3	5	1071	-50	1012
4	5	1012	-50	953
5	5	953	-50	894
6	5	894	-50	835
7	5	835	-50	776
8	5	776	-50	717
9	5	717	-50	658
10	5	558	-50	590
11	5	590	-50	540
12	5	540	-50	481
13	5	481	-50	422
14	5	422	-50	363
15	5	363	-50	304
16	5	304	-50	245
17	5	245	-50	186
18	5	186	-50	127
19	5	127	-50	68
20	5	68	-50	9

Prevención catódica galvánica de nuevas estructuras

A diferencia del ejemplo anterior, si la prevención catódica galvánica se realiza en nuevas estructuras, las armaduras están en un entorno alcalino y no contaminado resultando todavía protegidas de las agresiones. En esta situación no necesitan una gran cantidad de corriente (necesaria en protección galvánica para pasivar las armaduras), ya que los ánodos simplemente sirven para mantener la pasividad ya presente en la armadura. Como en tabla anterior, podemos ver que considerando 1 mA como el valor de la corriente suministrada constante en el tiempo (segunda columna de la tabla), podemos calcular la duración de una masa de zinc utilizada, en este caso, para evitar la formación de corrosión en una estructura. La pérdida de peso anual, calculada en función del consumo teórico (12 kg/A•año) y de la corriente suministrada (1 mA) es, por tanto, de 12 g/año. De esta manera podemos calcular que una masa de 460 g de zinc utilizada para la prevención catódica galvánica puede durar casi 40 años antes de agotarse (Tabla 6).

Tabla 6. Consumo estimado de MAPESHIELD I en estructuras nuevas

DURACIÓN AÑOS	CORRIENTE mAmps	Q.TA' Zn / Mq g	PÉRDIDA PESO g / Año	PESO RESIDUO g
1	1	460	-12	448
2	1	448	-12	436
3	1	436	-12	424
4	1	424	-12	412
5	1	412	-12	400
6	1	400	-12	388
7	1	388	-12	376
8	1	376	-12	364
9	1	364	-12	352
10	1	352	-12	340
11	1	340	-12	328
12	1	328	-12	316
13	1	316	-12	304
14	1	304	-12	292
15	1	292	-12	280
16	1	280	-12	268
17	1	268	-12	256
18	1	256	-12	244
19	1	244	-12	232
20	1	232	-12	220
21	1	220	-12	208
22	1	208	-12	196
23	1	196	-12	184
24	1	184	-12	172
25	1	172	-12	160
26	1	160	-12	148
27	1	148	-12	136
28	1	136	-12	124
29	1	124	-12	112
30	1	112	-12	100
31	1	100	-12	88
32	1	88	-12	76
33	1	76	-12	64
34	1	64	-12	52
35	1	52	-12	40
36	1	40	-12	28
37	1	28	-12	16
38	1	4	-12	4

6.6.2.Elección y espaciado de los ánodos Mapeshield I

El estudio del número y posicionamiento de los ánodos MAPESHIELD I debe realizarse no solo sobre la base de la densidad de armado, calculada como la relación entre la superficie lateral de las barras de acero a proteger y la superficie de hormigón que entra en contacto con el contaminante, sino también teniendo en consideración la geometría y la exposición de la estructura a los agentes agresivos. Por lo tanto, los ánodos no tendrán que colocarse necesariamente en todos los elementos estructurales, sino solo en aquellos elementos que estén particularmente expuestos a la corrosión.

Las gráficas que siguen para la determinación de la distancia entre ánodos son el resultado de cálculos precisos efectuados por ingenieros especialistas en corrosión.

Estructuras ya degradadas

La elección del ánodo depende en particular de tres factores principales:

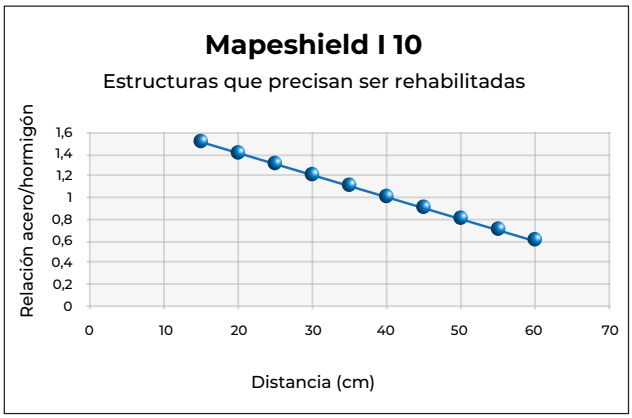
- la geometría de la estructura;
- el tamaño de la estructura;
- la duración de la pasividad a garantizar en las barras de armadura en todas las condiciones, incluso en presencia de cloruros o de grietas.

Mapeshield I está disponible en 4 tipos diferentes:

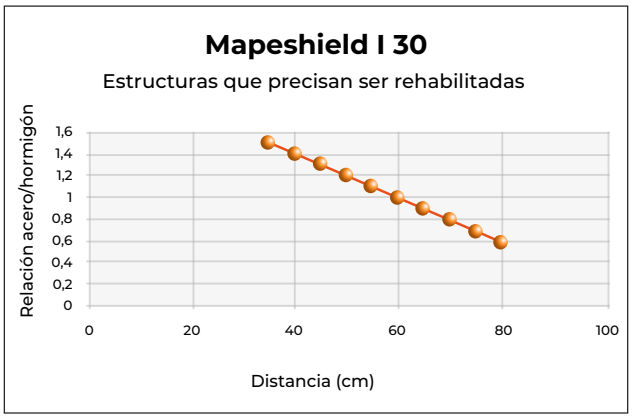
- Mapeshield I 10/10.
- Mapeshield I 10/20.
- Mapeshield I 30/10.
- Mapeshield I 30/20.

Donde el primer número indica la longitud (10 y 30 cm), mientras que el segundo indica la duración (10 y 20 años) en relación con la masa del ánodo.

Para una mayor comprensión, asumiendo que se restaurará una estructura fuertemente armada (relación acero/hormigón 0,8-1), utilizando un ánodo de 30 cm de largo con una duración de 20 años (Mapeshield I 30/20), del gráfico correspondiente obtenemos que los ánodos necesarios para proteger la superficie deberán estar distanciados 70 cm entre ellos.



Distancia entre los ánodos Mapeshield I 10 aplicados en estructuras a rehabilitar en función de la densidad de armadura



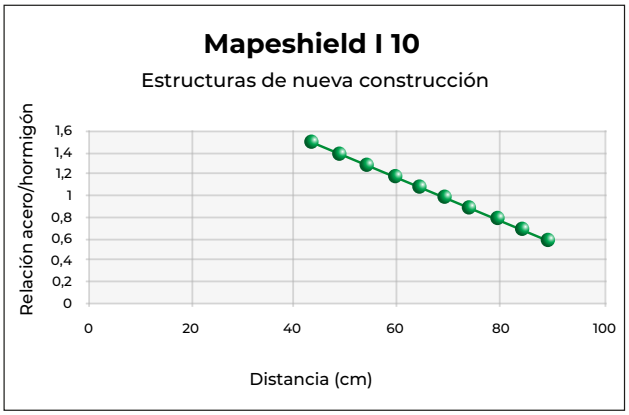
Distancia entre los ánodos Mapeshield I 30 aplicados en estructuras a rehabilitar en función de la densidad de armadura

Figuras 37 y 38. Distancia entre ánodos MAPESHIELD I en estructuras degradadas

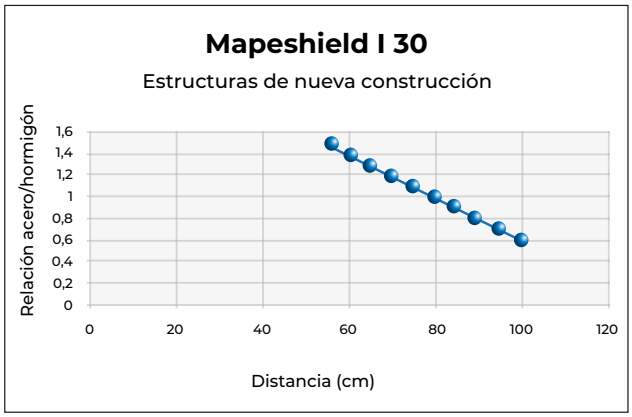
Estructuras de nueva construcción

Para la protección de estructuras de nueva construcción, el número de ánodos es inferior al requerido en las obras a restaurar y la duración es mucho mayor.

Esto es gracias a que en las nuevas obras las armaduras se encuentran en estado de pasividad y, en estas condiciones, la corriente necesaria para mantenerlas protegidas es mínima. Por ejemplo, en una estructura altamente reforzada (relación acero/hormigón 0,8-1) de nueva construcción, la colocación de los ánodos Mapeshield I 10/20 a una distancia de 90 cm (ver gráfico correspondiente), permite la protección contra la corrosión durante unos 40 años y, cuando los ánodos se hayan completamente consumido, las armaduras todavía estarán en un estado pasivo.



Distancia entre los ánodos Mapeshield I 10 aplicados en estructuras de nueva construcción en función de la densidad de armadura



Distancia entre los ánodos Mapeshield I 30 aplicados en estructuras de nueva construcción en función de la densidad de armadura

Figuras 39 y 40. Distancia entre ánodos MAPESHIELD I en estructuras nuevas

6.6.3. Elección y espaciado de los ánodos externos Mapeshield E 25

El nivel de protección depende de la densidad de la armadura en la estructura. En estructuras fuertemente armadas, Mapeshield E 25 debe aplicarse sobre toda la superficie a proteger. En el caso, en cambio, de baja densidad de armadura la distancia entre las láminas puede aumentar hasta un máximo de 50 cm. Este cálculo puede efectuarse utilizando la tabla relativa al espaciado que sigue a continuación y que es el resultado de cálculos precisos efectuados por ingenieros especialistas en corrosión (Tabla 7).

Tabla 7. Distancia entre ánodos Mapeshield E 25, aplicados en estructuras degradadas, en función de la densidad de armadura y la duración esperada en años

	DURACIÓN AÑOS							
	22	20	19	18	17	16	15	14
	DISTANCIA ENTRE LAS LÁMINAS (cm)							
0,1	50	50	50	50	50	50	50	50
0,2	50	50	50	50	50	50	50	50
0,3	50	50	50	50	50	50	50	50
0,4	50	50	50	50	50	50	50	50
0,5	50	50	50	50	50	50	50	50
0,6	50	50	50	50	50	50	50	50
0,7	20	20	50	50	50	50	50	50
0,8	15	15	20	20	20	50	50	50
0,9	10	15	15	15	20	20	20	50
1,0	5	5	10	15	15	15	20	20
1,1	0	5	5	5	10	15	15	15
1,2	0	0	0	5	5	10	10	15
1,3	0	0	0	0	0	5	5	10
1,4	0	0	0	0	0	0	5	5
1,5	0	0	0	0	0	0	0	5
1,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1,7	0	0	0	0	0	0	0	0

Limitaciones de los ánodos galvánicos

Los SACP también tienen sus limitaciones. La principal limitación operativa es que la resistencia entre el ánodo y el acero fija el flujo de corriente. El sistema, en efecto, está operando a un voltaje aplicado constante y sin cambios. Una limitación adicional es, que después de un tiempo suficiente, se consume suficiente ánodo de modo que ya no se puede suministrar la corriente de protección y la corrosión del refuerzo de acero puede comenzar de nuevo. El consumo del ánodo de sacrificio se produce debido a un efecto galvánico deseado y un efecto de auto corrosión no deseado. La capacidad de suministrar corriente protectora en relación con la pérdida que se produce como resultado de la auto corrosión se denomina “eficiencia” del ánodo galvánico. Los ánodos galvánicos a veces se mejoran químicamente para proporcionar mayores eficiencias o salidas de corriente más altas cuando sea necesario.

Una limitación importante a tener en cuenta en el diseño de estos sistemas es conocer la presencia de corrientes erráticas o vagabundas, que pueden ser dinámicas (dependientes del tiempo por causas ajenas) por ejemplo procedentes de sistemas tractivos en corriente continua (ferrocarriles, metro, tranvías) o estáticas, por ejemplo, en paralelismos o cruces con líneas aéreas de alta tensión. Deberá valorarse también el previsible cambio a futuro por instalaciones no existentes. Los sistemas de SACP puede que no sean eficaces en presencia de tales corrientes foráneas afectantes.

Dentro de la categoría de “ánodos galvánicos” también existe la técnica de aplicación de recubrimiento de Zn en espray. Se trata de proyección de Zn fundido en espray a alta presión. Dado que es una técnica de alta complejidad en aplicación y sin aplicadores en España, no se tratará en esta guía. Sin embargo, una alternativa será la lámina externa de zinc.

7. Corriente impuesta

Introducción

El procedimiento actualmente más utilizado en las zonas aéreas de las estructuras es mediante corriente impuesta aplicada a través de una fuente de corriente continua o transforrectificador (figuras 41 y 42), de forma que el polo positivo se conecta a un ánodo auxiliar llamado electrodo dispersor de corriente y el polo negativo se conecta a la armadura (estructura a proteger). Normalmente se instalan electrodos de referencia (Ag/AgCl) para control de potenciales y autoajuste de las intensidades de corriente de salida. Además, debe disponerse también de electrodos para mediciones extensivas de la protección catódica. En la actualidad existen sistemas telegestionados de adquisición de datos y visualización de alarmas de funcionamiento anómalo.

7.1. Normativa

Aplica la misma que para ánodos de sacrificio:

UNE-EN ISO 12696 (2017). Protección catódica de acero en el hormigón (ISO 12696:2016).

- aplica a la protección catódica del acero en el hormigón expuesto a la atmósfera, enterrado o sumergido. No es un código de diseño, sino una que es norma para el diseño y control de la efectividad de funcionamiento de la protección catódica.
- especifica los requisitos precisos para la eficacia de la protección catódica del acero en hormigón, tanto para las estructuras nuevas como para las ya existentes. Cubre estructuras de edificación e ingeniería civil, incluyendo armaduras normales y armaduras pretensadas embebidas en el hormigón. Es aplicable a armaduras de acero sin recubrir y a armaduras de acero revestidas por un recubrimiento orgánico.

7.2. Características de los sistemas

Los sistemas por ICCP son sistemas que constan básicamente de los siguientes elementos:

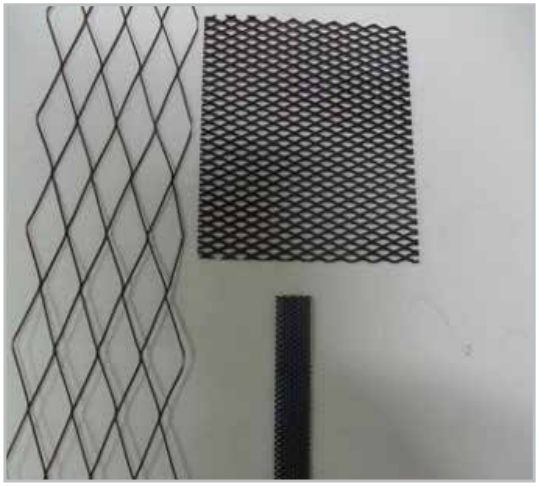
- un equipo transforrectificador (T/R): se encarga de transformar la corriente alterna de la red eléctrica de alimentación (monofásica o trifásica, 230 V, 380 V) a corriente de componente continua que se inyecta a través del lecho anódico dispersor. Se fabrican según necesidades de tensiones e intensidades de salida según lo calculado para cada proyecto concreto. En grandes infraestructuras puede que sea preciso instalar más de un T/R para obtener las intensidades de salida requeridas. Aplicará sobre el diseño de estos T/R la normativa eléctrica particular de cada país de instalación.

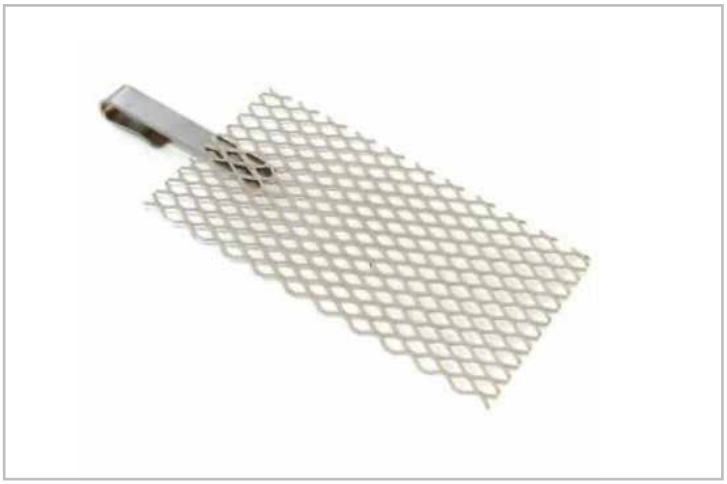




Figuras 41 y 42. Vista general de un equipo transforrectificador para protección catódica

- Un lecho anódico dispersor de la corriente de protección. Se trata generalmente de ánodos de titanio con recubrimiento electrolítico de metales nobles (Os, Ru, Ir,...) en forma de mallas o cintas de muy bajo espesor (figuras 43 y 44). Estos ánodos se denominan de tipo DSA (Dimensional Stable Anodes) pues su desgaste es ínfimo por unidad de corriente circulante por su superficie, por lo que se dan garantías de funcionamiento por norma general superiores a los 40 años.





Figuras 43 y 44. Detalle de ánodos de inyección de corriente tipo malla de titanio, en diferentes configuraciones

- Un sistema de control para el autoajuste del T/R mediante uno (o varios) electrodos de Ag/AgCl embebidos en el hormigón (figura 45). Además, deben tenerse otros electrodos para mediciones extensivas de protección catódica, incluso es recomendable que dispongan de probetas de corrosión para determinar mediciones de polarización en OFF. Se instalan como indica la figura 46, cerca de la armadura pero sin tocarla.

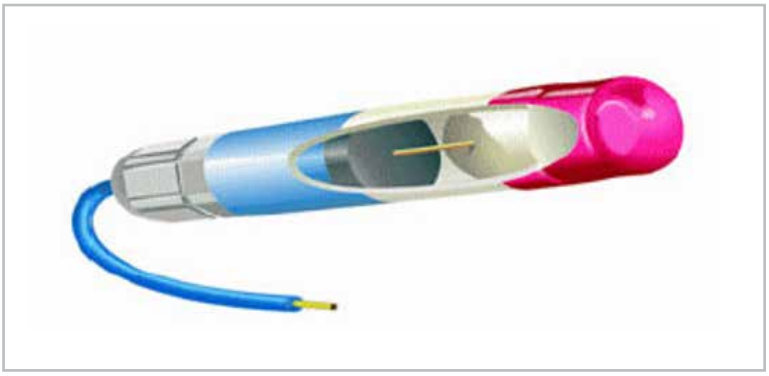


Figura 45. Dibujo esquemático de un electrodo de referencia de Ag/AgCl



Figura 46. Ejemplo de instalación de un electrodo permanente de Ag/AgCl junto a armadura

7.3. Fases de puesta en obra

Cabe distinguir entre:

- estructuras que necesiten ser reparadas
- estructuras de nueva construcción

7.3.1. Estructuras que necesiten ser reparadas

Preparación del soporte

El soporte debe prepararse adecuadamente, eliminando el hormigón deteriorado y en fase de desprendimiento, y, si fuera necesario, incluso por debajo de la armadura hasta llegar a un soporte sólido, resistente y rugoso. Deberán eliminarse los eventuales tratamientos previos de reparación que no estén perfectamente adheridos. Se eliminará de la armadura expuesta todo resto de óxido para garantizar un buen contacto entre el acero y el mortero u hormigón de reparación. Antes de instalar el ánodo de dispersión de corriente se debe verificar la continuidad eléctrica de la armadura con ayuda de un "tester".

Aplicación de los ánodos de inyección de corriente:

La malla de los ánodos se colocará una vez se haya recubierto la armadura con hormigón, para evitar posibles cortocircuitos, y antes de acabar con el proceso de rellenado de la estructura. Consecuentemente, estos ánodos quedarán instalados a distancias centimétricas de las armaduras. Si ello no fuera posible, se instalarán los ánodos con soportes aislantes desde la armadura para poder garantizar que bajo ningún concepto haya un contacto directo entre ánodo y armadura (se produciría cortocircuito al poner el sistema en funcionamiento y quedaría invalidada su instalación). Desde la malla del ánodo dispersor se llevará más de un cable de conexión, normalmente a través de una caja de conexiones hasta el transforrectificador. El cable de salida de la intensidad representará el "positivo" del sistema de corriente impuesta, y deberá quedar claramente identificado y correctamente conectado al polo positivo del T/R.

Aplicación del mortero de reparación

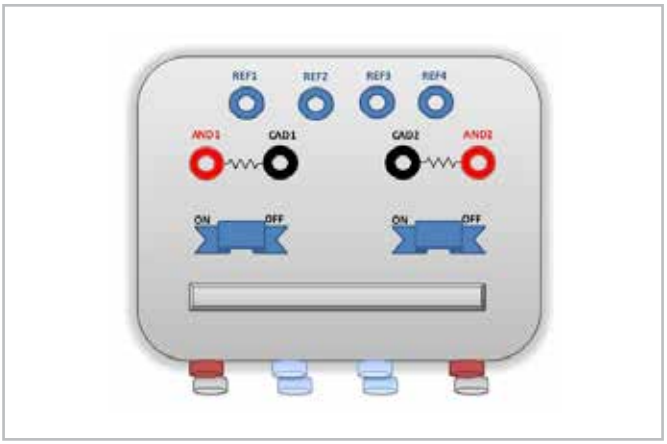
La reparación de las estructuras debe llevarse a cabo con un mortero adecuado. La resistividad eléctrica del mortero de reparación debe estar comprendida en un rango de entre el 50% y el 200% de la del hormigón original, hasta un máximo de 100 kΩ, de acuerdo con lo establecido en la EN 12696.

La mayoría de los morteros de la línea MAPEGROUT cumplen los requisitos y están recomendados para la reparación de estructuras protegidas con sistemas de corriente impuesta. Ejecutar la reparación de acuerdo con los procedimientos de aplicación habituales, consultando para ello la ficha técnica correspondiente al producto elegido para la reparación.

Conexiones a armadura: una vez se haya certificado la continuidad eléctrica de las armaduras (y si no se deberán haber realizado los puenteos necesarios para garantizarla), se instalarán cables de conexión a la misma para llevarlos al equipo transforrectificador (T/R). Es deseable disponer de más de un punto de unión, centralizándolos en una caja de conexiones hasta el T/R. El cable de conexión a la armadura representará en "retorno" al T/R y será el "negativo" del sistema de corriente impuesta, debiendo quedar claramente identificado y correctamente conectado al polo negativo del T/R.

Electrodos de referencia de control del ICCP: se dispondrán varios electrodos de referencia para el control de funcionamiento del T/R. Estos serán de Ag/AgCl y es recomendable que se hayan instalado lo más cerca posible de la armadura antes de su hormigonado. Se centralizarán cables de más de un electrodo hasta una caja de conexiones intermedia, y de ellos se seleccionará el más adecuado para control del autoajuste de funcionamiento del transforrectificador (modo de funcionamiento en automático).

Electrodos de referencia de control de la protección catódica: se dispondrán varios electrodos de referencia (por ejemplo Ag/AgCl) para el control de potenciales y mediciones extensivas de protección catódica (despolarización en OFF y a lo largo de un periodo temporal). En el caso de que haya instalado un solo T/R podrán hacerse las mediciones en OFF interrumpiendo la salida de éste mediante un interruptor cíclico, pero si hay más de uno deberá hacerse la interrupción sincronizada (control por satélite del tiempo de interrupción), o disponer de estos electrodos con probeta metálica de 10 cm^2 para poder hacer las mediciones en OFF.





Figuras 47 y 48. Vista esquemática del frontal y de una caja de conexiones de electrodos de referencia para mediciones en OFF

7.3.2. Estructuras de nueva construcción

Preparación del soporte

Se eliminará de la armadura expuesta toda partícula de material corroído y no adherente, para garantizar un buen contacto entre el acero y el mortero u hormigón. Se procederá a hormigonar la armadura (previamente se habrán instalado los electrodos de referencia y las uniones del cable de "negativo" de retorno al T/R) hasta el límite de la misma y que no sea ya visible. Antes de instalar el ánodo de dispersión de corriente se debe verificar la continuidad eléctrica de la armadura con ayuda de un "tester".

Aplicación de los ánodos de inyección de corriente

La malla de los ánodos se colocará una vez se haya recubierto la armadura con hormigón, para evitar posibles cortocircuitos, y antes de acabar con el proceso de rellenado de la estructura. Consecuentemente, estos ánodos quedarán instalados a distancias centimétricas de las armaduras. Si ello no fuera posible, se instalarán los ánodos con soportes aislantes desde la armadura para poder garantizar que bajo ningún concepto haya un contacto directo entre ánodo y armadura (se produciría cortocircuito al poner el sistema en funcionamiento y quedaría invalidada su instalación). Desde la malla del ánodo dispersor se llevará más de un cable de conexión, normalmente a través de una caja de conexiones hasta el transforrectificador. El cable de salida de la intensidad representará el "positivo" del sistema de corriente impuesta, y deberá quedar claramente identificado y correctamente conectado al polo positivo del T/R.



Figura 49. Detalle de la instalación de ánodos de corriente impuesta tipo malla en un pilar y viga antes de la aplicación del mortero final

Aplicación del mortero final

Una vez instalado el ánodo dispersor se procederá al remate de la estructura con el hormigonado final. Deberá tenerse precaución para las salidas centralizadas de los cables de "positivo", "negativo" y "electrodos de referencia", que se centralizarán en cajas de conexiones desde las que partirán los cables hacia el T/R correspondiente.

Conexiones a armadura: una vez se haya certificado la continuidad eléctrica de las armaduras (y si no se deberán haber realizado los puenteos necesarios para garantizarla), se instalarán cables de conexión a la misma para llevarlos al equipo transforrectificador (T/R). Es deseable disponer de más de un punto de unión, centralizándolos en una caja de conexiones hasta el T/R. El cable de conexión a la armadura representará en "retorno" al T/R y será el "negativo" del sistema de corriente impuesta, debiendo quedar claramente identificado y correctamente conectado al polo negativo del T/R.

Electrodos de referencia de control del ICCP: se dispondrán varios electrodos de referencia para el control de funcionamiento del T/R. Estos podrán ser por ejemplo de Ag/AgCl y es recomendable que se hayan instalado lo más cerca posible de la armadura antes de su hormigonado. Se centralizarán cables de más de un electrodo hasta una caja de conexiones intermedia, y de ellos se seleccionará el más adecuado para control del autoajuste de funcionamiento del transforrectificador (modo de funcionamiento en automático).

Electrodos de referencia de control de la protección catódica: se dispondrán varios electrodos de referencia (por ejemplo de Ag/AgCl) para el control de potenciales y mediciones extensivas de protección catódica (despolarización en OFF y a lo largo de un periodo temporal). En el caso de que haya instalado un solo T/R podrán hacerse las mediciones en OFF interrumpiendo la salida de éste mediante un ciclador, pero si hay más de uno deberá hacerse la interrupción sincronizada (control por satélite del tiempo de interrupción), o disponer de estos electrodos con probeta metálica de 10 cm^2 para poder hacer las mediciones en OFF.

7.4. Métodos de verificación de la eficacia

El procedimiento de control está descrito en la EN 12696 y se ha mencionado anteriormente que establece:

- Una despolarización, dentro de las 24 horas posteriores a la desconexión, de al menos 100 mV respecto al valor de potencial medido entre 0,1 s y 1 s después de la desconexión del ánodo ("instant off");
- Una despolarización durante un largo periodo (> 24 horas) de al menos 150 mV después del apagado instantáneo ("instant off").

También se puede comprobar la eficacia midiendo la velocidad de corrosión. Si se desconecta la corriente, a las 24 horas la I_{corr} debe ser menor de 0.2 $\mu A/cm^2$.

Sin desconectar la corriente se puede verificar con la técnica PVT antes descrita.

7.5. Mantenimiento

El sistema de protección catódica por corriente impuesta requiere de un mantenimiento constante, para certificar que siempre está correctamente alimentado de tensión eléctrica externa y los parámetros funcionales son estables en concordancia con los potenciales deseados de la estructura. Se establecerán rutinas semanales de comprobación en los T/R, y trimestrales o semestrales de comprobación de polarizaciones catódicas adecuadas. Aquellos sistemas que se hayan diseñado con sistemas de televigilancia deberán ser monitorizados diariamente para descartar alarmas de funcionamiento anómalo.

En caso de anomalías, o sospechas de anomalías, deberá consultarse con una empresa especializada y proceder correctivamente a la mayor brevedad posible.

7.6. Especificaciones de proyecto

En general, según el apartado 4.3 de la norma UNE-EN ISO12696:2016, las instalaciones de protección catódica para aceros en hormigón deben ser objeto de un diseño detallado, que debe incluir, como mínimo:

- cálculos detallados.
- planos detallados de la instalación.
- especificaciones detalladas del material y equipos de la instalación.
- instrucciones o especificaciones detalladas de instalación, de los ensayos, de la puesta en tensión, de la puesta en servicio y del funcionamiento.
- evaluación de las estructuras que contienen pretensado por su susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno y por el riesgo de corrientes erráticas.

Limitaciones para la aplicación de protección catódica mediante corriente impuesta.

Los sistemas por ICCP también tienes sus limitaciones.

La principal limitación operativa es la dependencia del suministro ininterrumpido de energía eléctrica. Además, debe considerarse la instalación de un equipo transforrectificador y sus correspondientes cableados, lo que puede ser fácilmente vandalizable si no se toman las oportunas precauciones al respecto.

Puede, también, si no se monitoriza con elevada frecuencia y no se regula adecuadamente, causarse sobreprotección catódica que puede conducir a la fragilización por hidrógeno y al agrietamiento por corrosión bajo tensión del acero pretensado.

En la instalación de los ánodos de inyección de corriente debe asegurarse mediante mediciones específicas que no se produce contacto entre ánodos y armaduras, pues en caso contrario se produciría cortocircuito del sistema y no sería operativo.

Por lo que se refiere a los requerimientos de criterios de protección catódica y mediciones de potenciales aplica lo mismo que lo indicado para el caso de los SAPC.

8. Comparativa de los sistemas de corriente impuesta y ánodos de sacrificio

La siguiente tabla resume las ventajas y limitaciones de los sistemas por ánodos de sacrificio (SAPC) y por corriente impuesta (ICCP).

Tabla 8. Comparación de los sistemas de corriente impuesta y ánodos de sacrificio

SISTEMAS POR ÁNODOS DE SACRIFICIO (SAPC)	SISTEMAS POR CORRIENTE IMPUESTA (ICCP)
VENTAJAS	
- Fácil instalación - Bajos requerimientos de mantenimiento - Inmune a cortes de energía. Sin costes de consumo eléctrico - No se puede producir sobreprotección catódica - No se pueden producir cortocircuitos - Válido para protección de superficies relativamente no muy grandes (hasta algunos centenares de m^2) - Imposibilidad de producir un cambio de polaridad en el sistema - Difícilmente vandalizables (solamente elementos de control vistos)	- Adecuado para proteger grandes superficies de infraestructuras (desde varios centenares a miles de m^2) - Salidas de corriente ajustables: sin limitaciones de resistencia eléctrica entre ánodo/acero - Larga duración de los ánodos de inyección de corriente impuesta (generalmente con vidas superiores a 40 años). - Sistema apto en presencia de corrientes erráticas o vagabundas (ferrocarriles, metro, líneas de alta tensión en paralelo o con apoyos cercanos)
INCONVENIENTES	
- Limitaciones de resistencia eléctrica entre ánodo/acero Si las resistencias son elevadas hacen inviable el correcto funcionamiento de los ánodos. - Consumo de los ánodos con el tiempo (deben reemplazarse). - Dificultad de correcto funcionamiento ante presencia de corrientes erráticas o vagabundas (ferrocarriles, metro, líneas de alta tensión en paralelo o con apoyos cercanos)	- Instalaciones de gran envergadura - Altos requerimientos de mantenimiento - Dependencia de energía eléctrica constante. Costes de consumo eléctrico - Puede producirse sobreprotección catódica - Posibilidad de producir cortocircuito si no se comprueba el correcto aislamiento entre ánodo y cátodo (acero). - Pueden quedar elementos visibles vandalizables (T/R, cableados externos, elementos de control) - Posibilidad de realizar una conexión errónea y cambiar la polaridad del sistema, lo que produciría corrosión acelerada de las armaduras

9. Inhibidores migratorios

Introducción.

Los Inhibidores de corrosión migratorios son productos generalmente basados en la química del aminocarboxilato y del aminoalcoholes, estos inhibidores de corrosión mixtos (impiden la reacción en el ánodo y en el cátodo) bajo condiciones normales presentan una fase vapor que es controlada por la estructura del compuesto y el carácter de la cadena de átomos de la molécula. El vapor protector difunde dentro la estructura porosa del hormigón hasta que el equilibrio determinado por su presión vapor es alcanzado; en ese momento condensa, dando lugar a una reacción de adsorción sobre la armadura que impide los procesos de corrosión (esta presión vapor oscila entre 10^{-3} a 10^{-5} mm Hg).

9.1. Normativa

No existe normativa específica aplicable.

9.2. Características de los sistemas

La aplicación de inhibidores de la corrosión migratorios (MCI) sobre estructuras construidas o en reparaciones se lleva a cabo mediante la adición de los inhibidores directamente por pulverización con brocha o con rodillo sobre el hormigón; este compuesto orgánico migra a través de la estructura porosa endurecida por los siguientes fenómenos en un proceso que, esquemáticamente, se produce en los siguientes pasos:

Acción capilar

El inhibidor de corrosión líquido penetra dentro del hormigón por presión osmótica y acción capilar tras su aplicación.

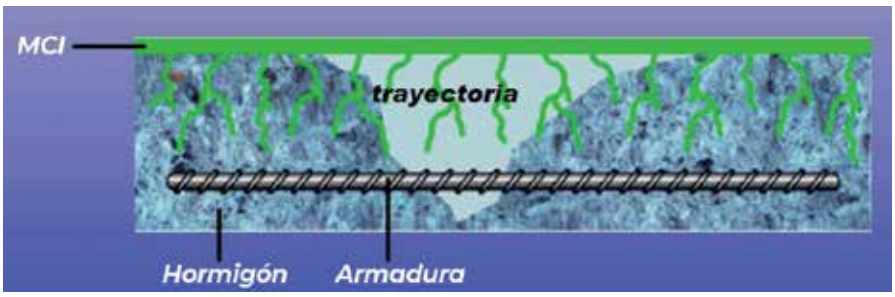


Figura 50. Mecanismo de actuación de los inhibidores migratorios

Difusión de vapor

El vapor se mueve a través del hormigón debido a gradientes de concentración.

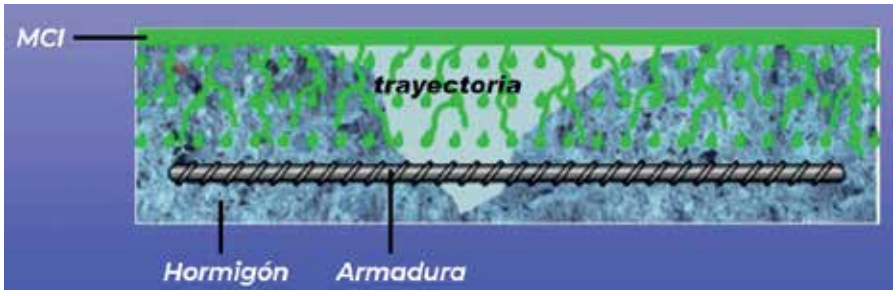


Figura 51. Difusión de vapor

Atracción iónica

Los iones viajan a través del hormigón atraídos por las áreas anódicas y catódicas de la armadura metálica debido a sus cargas "+" y "-".

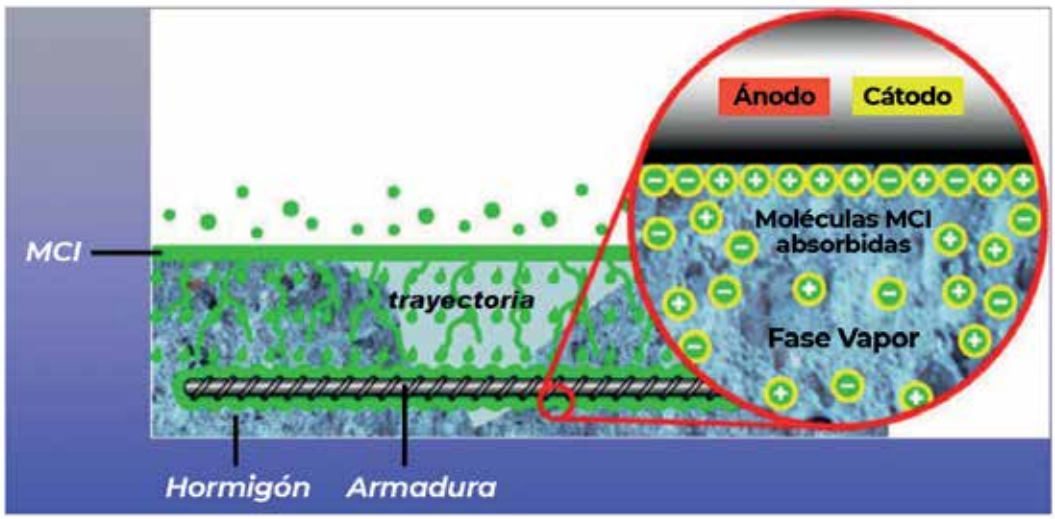


Figura 52. Detalle del funcionamiento de los inhibidores migratorios

Una vez que el MCI llega a la armadura el producto forma una capa monomolecular, debido a que:

- las sales iónicas se separan en iones.
- reaccionan o enlazan con la superficie del metal.
- se establece una adsorción física.

El resultado es una reducción drástica de la corrosión por:

- cambio de potencial en las áreas anódicas y catódicas.
- formación de capa hidrofóbica que impide la penetración de los iones que causan la corrosión (en el caso de los aminocarboxilatos).
- el nitrógeno presente en las moléculas de MCI forma un enlace sobre la armadura (mucho más poderoso en el caso de los aminocarboxilatos).

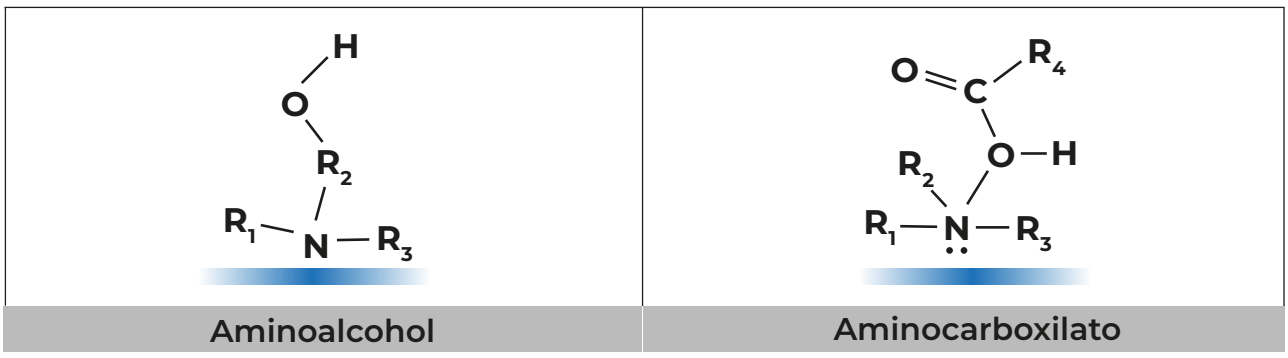


Figura 53. Estructura molecular de los diferentes inhibidores

Ilustración de la interacción molecular de inhibidores tipo aminoalcohol y aminocarboxilato; los grupos R1, R2 y R3 son H o grupos alquilo, mientras que los aminoalcoholes presentan una terminación OH y los aminocarboxilatos disponen de una terminación hidrofóbica R4.

La figura 54 indica la evolución de la pérdida de peso en el caso de una estructura tratada con MCI (aminocarboxilato) y sin tratar, a 2 y 3 cm de profundidad. Las líneas de puntos indican que si no hay MCI la armadura se corroe y pierde peso, mientras que cuando está tratada con MCI (líneas continuas) la pérdida de peso casi se detiene.

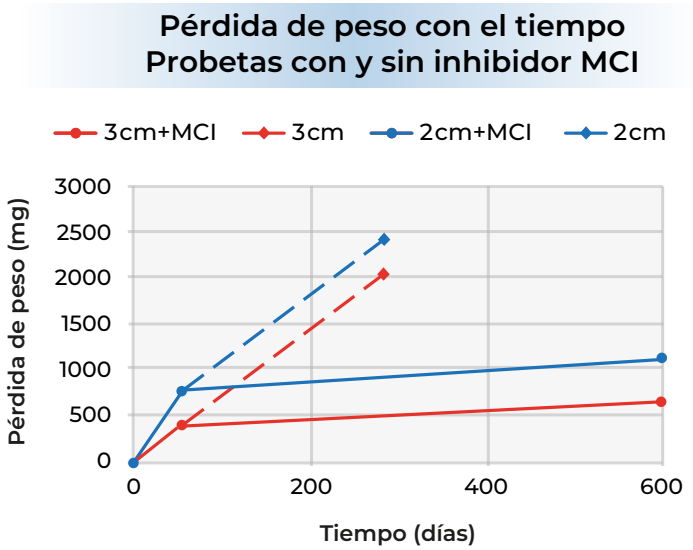


Figura 54. Evolución de la pérdida de peso con el tiempo de una armadura con diferente recubrimiento de hormigón tras la despasivación con cloruro y la aplicación posterior de un inhibidor de corrosión migratorio (aminocarboxilato)

Seguidamente se expone un pequeño resumen que diferencia de forma básica ambas formulaciones.

Tipos de productos con inhibidores de corrosión migratorios.

La posibilidad que presentan los aminoalcoholes de ser mezclados con productos de mejora superficial, hace que existan en el mercado cuatro tipo de productos; estos son:

- inhibidor de la corrosión migratorio tipo aminoalcohol puro.
- inhibidor de la corrosión tipo aminoalcohol con mineralizador.
- inhibidor de la corrosión tipo aminoalcohol con hidrofugante.
- inhibidor de la corrosión tipo aminocarboxilato.

Inhibidores de corrosión basados en aminoalcoholes.

Este tipo de inhibidores migratorios son los inicialmente desarrollados por la industria; tienen una carga parcial + y otra – dentro de la propia molécula que hace que sea atraída por el acero, aunque la carga de la molécula es cero. Estas cargas parciales son atraídas por el cátodo y el ánodo lo que hace que reduzcan la corrosión. Este tipo de productos, según los estudios realizados, extiende ligeramente el tiempo de inicio de la corrosión y cuando esta comienza disminuyen la ratio de corrosión a la mitad con relación al control. Este tipo de productos pueden presentarse mezclados con productos de mejora superficial.

Inhibidores de corrosión basados en aminocarboxilatos.

Este tipo de inhibidores migratorios son el desarrollo químico conseguido para mejorar las deficiencias que presentaban los anteriores. Al igual que los aminoalcoholes, tienen cargas parciales + y -, pero a diferencia de estos tenemos:

1°.- Parte de las moléculas reaccionan con el hormigón (reaccionan con el hidróxido cálcico) formando sales insolubles y sellando los poros, evitando así el futuro ingreso de atacantes externos.

2°.- El grupo terminal de los aminoalcoholes es el OH; esto hacen que estos interaccionen con el agua (electrolito) alrededor de la armadura, lo que provoca que este film quimiadsorbido sea más fácilmente removible; en el caso de los aminocarboxilatos el grupo terminal es un grupo hidrofóbico, lo cual le permite aumentar su resistencia frente al electrolito.

3°.- Al mismo tiempo, las moléculas libres N+ y COO- se ven atraídas por las áreas catódicas y anódicas del acero. Debido a que estas cargas son reales, la afinidad por el acero es mayor que en el caso anterior de moléculas parcialmente cargadas.

Estas razones hacen que este tipo de inhibidores proporcionen una mejor reducción de la corrosión que los aminoalcoholes. Los estudios realizados demuestran que doblan y triplican el tiempo de inicio de la corrosión y en el momento que esta comienza retardan la corrosión cinco o más veces con relación al control sin inhibidor.

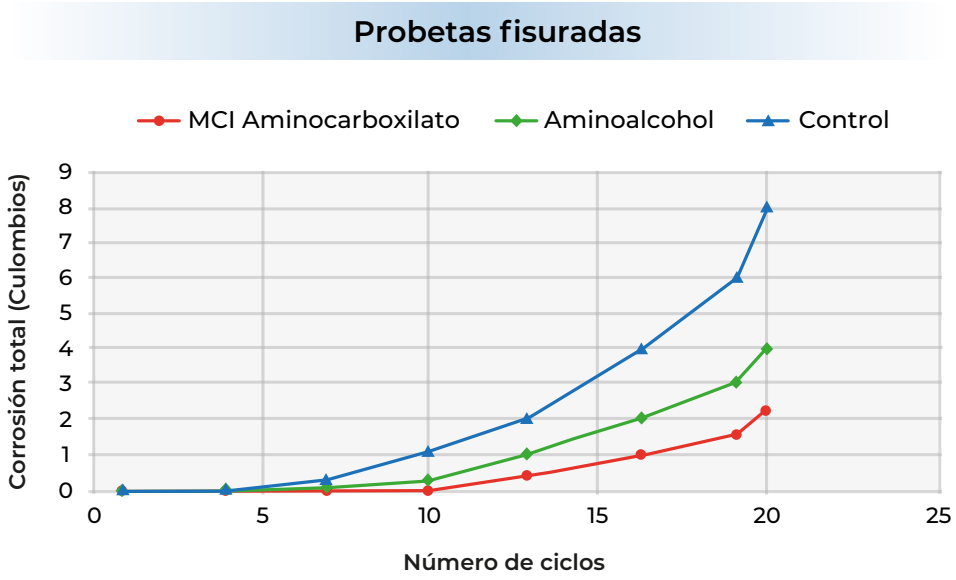


Figura 55. Comparación del poder inhibidor de la corrosión en probetas fisuradas, de diferentes tipos de inhibidores frente a la probeta control

Los inhibidores de corrosión migratorios en base amina funcionan como inhibidores de la corrosión mixtos por lo que, y a diferencia de los inhibidores de corrosión anódicos, no poseen una dosificación diferente en función de los iones cloruro del medio al que se encuentre expuesta la estructura.

Si que existe diferente dosificación, pero siempre en función del tipo de inhibidor migratorio utilizado y sea indicado por el fabricante que, además, especificará el número de capas en el que se logra alcanzar esta concentración y los métodos de control a realizar.

9.3. Fases de puesta en obra y ejemplos

La puesta en obra de este tipo de productos es bastante sencilla generalmente; se trata de materiales que se aplican mediante brocha, rodillo o spray, por lo que solamente hay que asegurar que la superficie de aplicación esté limpia y seca (si no estuviera seca y fuera imposible por la localización del trabajo hay que consultar la humedad máxima admisible) y seguir las pautas de número de manos y dosificación reflejadas en la ficha técnica.





Figuras 56, 57 y 58. Diferentes métodos de aplicación de los inhibidores migratorios

Ejemplo 1: aplicación de aminoalcohol con sellante.

Obra: viaductos en zona de alta montaña con presencia de sales fundentes (año 2006); superficie: 16.000 m².

Descripción: Obra de nueva construcción en la que se requiere dar a la estructura una mayor protección anticorrosiva frente a sales fundentes y mejorar la resistencia a los ciclos de hielo deshielo que acontecen en la zona. No hay problemas previos, se trata de una protección preventiva.




Figuras 59 y 60. Aplicación de aminoalcohol con sellante

Ejemplo 2: aplicación de aminocarboxilato

Obra: conducciones de suministro de agua potable (año 2014) superficie: 7.000 m²

Descripción: obra de reparación de tuberías de hormigón cuyo principal origen de la corrosión es la carbonatación.



Figura 61. Tubería sobre la que se está aplicando el inhibidor MCI (aminocarboxilato)

En la figura 62 se muestran los datos de velocidad de corrosión antes y después de aplicar el inhibidor. Puede comprobarse que antes de aplicar el inhibidor varios de los puntos seleccionados para el control presentaban valores superiores a 0.1-0,2 µA/cm² indicativos de corrosión activa. Después de aplicar el inhibidor, todos los valores resultan menores que ese umbral indicando la repasivación de las armaduras.

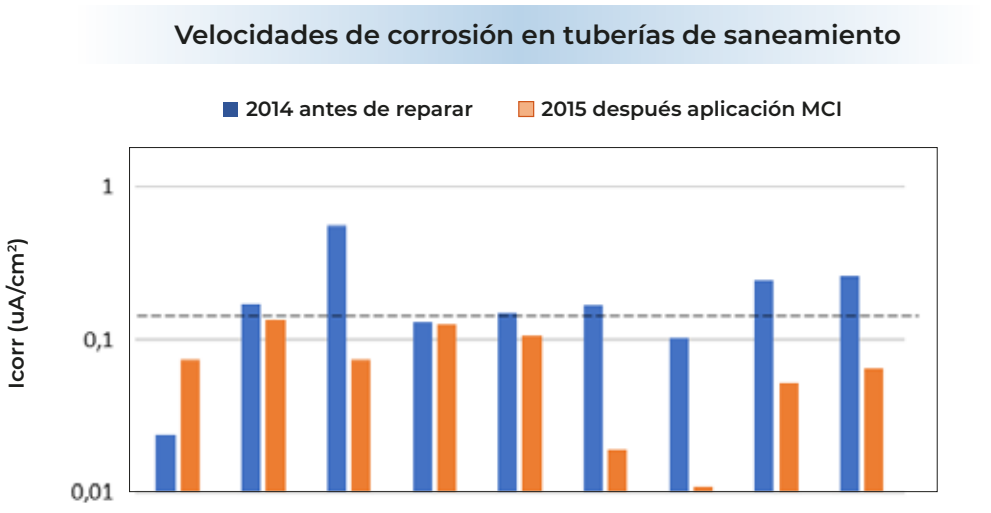


Figura 62. Velocidades de corrosión antes y después de la aplicación del inhibidor MCI (aminocarboxilato)

Ejemplo 3: aplicación de aminocarboxilato.

Obra: puerto (año 2012); superficie: 2.000 m².

Descripción: obra de reparación de apoyos y soleras de vanos del muelle, cuyo principal origen de la corrosión son los cloruros.



Figura 63. Referencia de obra Dársena

Ejemplo 4: aplicación de aminocarboxilato.

Obra: puerto (año 2005); superficie 18.000 m².

Descripción: obra de reparación de pantalán con ataque corrosivo, cuya procedencia son los iones cloruro.

Similar al caso anterior, en la figura 65 se muestra un aspecto del pantalán antes de repararlo en el que se aprecian los graves daños debajo del forjado.





Figuras 64 y 65. Valores de velocidad de corrosión antes y después de la aplicación del inhibidor MCI en el pantalán de un puerto

En 2005 el pantalán fue inspeccionado y los valores de velocidad de corrosión encontrados se muestran en la figura 66. Todos los valores estaban por encima del umbral de 0.1-0,2 μA/cm². Entonces fue tratado con el inhibidor MCI y nuevas medidas se realizaron en 2006 en las que se apreció una reducción significativa de las velocidades de corrosión. Realizadas las medidas nuevamente en 2008, los valores habían disminuido todavía mucho más.

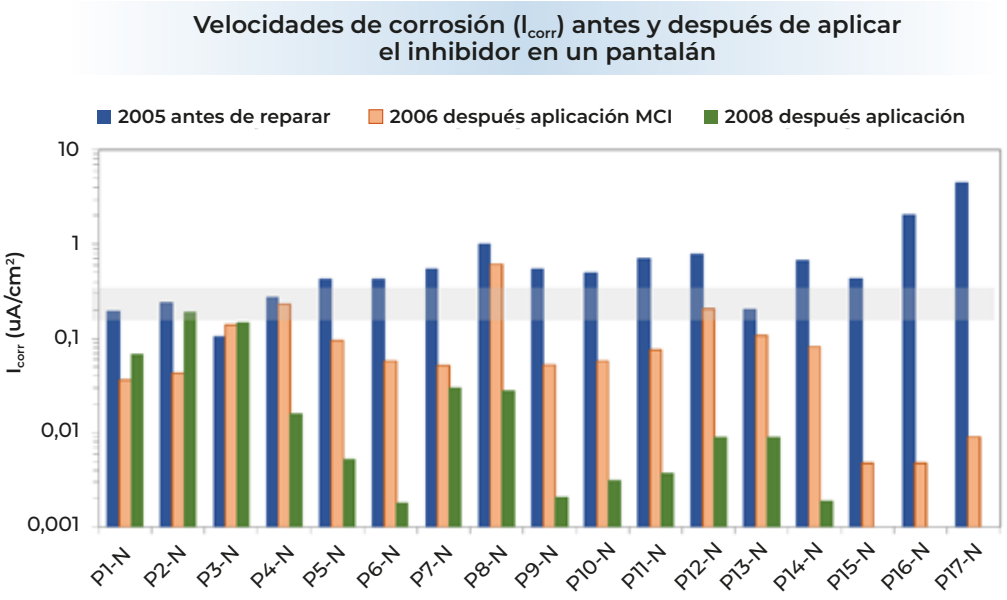


Figura 66. Velocidades de corrosión antes y después de la aplicación del inhibidor MCI (aminocarboxilato)

9.4. Métodos de verificación de la eficacia

Como se indicó anteriormente, la manera más adecuada de comprobar su eficacia es medir la velocidad de corrosión en la propia obra antes y después de la aplicación del inhibidor. El valor de la I_{corr} después de la aplicación debe ser menor de 0.2 µA/cm^2.

9.5. Mantenimiento

La aplicación de inhibidores no necesita ningún mantenimiento diferente del propio de la estructura.

Se debe medir la velocidad de corrosión dentro del plan de mantenimiento para comprobar que sigue manteniéndose en los niveles de corrosión despreciables. Si la velocidad de corrosión aumentara, se debería proceder a un nuevo tratamiento con el inhibidor.

9.6. Especificaciones de proyecto

A diferencia de la protección catódica, los inhibidores de corrosión migratorios no tienen ninguna normativa específica de aplicación en proyecto, por lo que se deberá valorar si son adecuados para la actuación que se lleva a cabo con los datos aportados por el fabricante.

Es necesario disponer, entonces, de un conocimiento de los factores que nos debe permitir evaluar la elección del inhibidor de corrosión más adecuado; estos esencialmente podemos dividirlos en dos partes; aquellos factores que son generales para todos estos tipos de productos y que nos marcarán si es posible usar esta tecnología o no, y otros particulares, pero igualmente de suma importancia que nos permitirán, una vez asegurado el uso de esta tecnología, elegir que tipo o tipos de inhibidores podrán usarse en el proyecto.

Factores generales de proyecto para la aplicación de productos con inhibidores de corrosión migratorios en superficie.

Exponemos a continuación aquellos factores que, como hemos adelantado, son comunes en el uso de esta tecnología:

- las superficies de hormigón deben de estar accesibles.
- solo se pueden usar para proteger frente a fenómenos de carbonatación o ataque por cloruros.
- la aplicación debe realizarse con temperaturas en un rango entre 5° C y 35° C.
- el soporte debe de estar limpio y seco.

- no se pueden aplicar si se alcanzara la temperatura de congelación pasadas unas horas (consultar en cada caso el tiempo exacto).
- no se pueden aplicar si existe la posibilidad de que llueva durante o posteriormente a su aplicación (consultar en el último caso el tiempo exacto).

Factores particulares de proyecto para la aplicación de productos con inhibidores de corrosión migratorios en superficie:

- tiempo hasta repintado; puede ser un aspecto muy importante ya que puede llegar a varias semanas en casos concretos (consultar en cada caso el tiempo exacto).
- número de manos a aplicar; el número de manos es un dato importante por el tiempo y el coste de mano de obra.
- agresividad hacia otros elementos de la construcción (cristales, metales, etc...) se ven atacados por este tipo de productos. Y también agresivos hacia elementos como jardines.
- en el caso de aplicaciones sobre medios pluviales o marinos, agresividad sobre flora y fauna en caso de contacto con estos.
- humedad del soporte, muy limitada en el caso de aminoalcoholes.
- necesidad o no de humedecer el soporte para mejorar la penetración entre manos.
- límite de concentración de cloruros es menor en el caso de aminoalcoholes que en el de los aminocarboxilatos (consultar en cada caso).
- dificultad de ser reaplicado en el caso de hidrofugantes y mineralizadores con inhibidor migratorio.
- validez para su uso en elementos que deban soportar presión hidrostática (los hidrofugantes con inhibidores migratorios no se pueden usar en este caso).
- validez o no para su uso en contacto con agua potable, en el caso de que así sea.

Finalmente, una vez seleccionado el tipo de producto a utilizar deberemos, en función de la durabilidad de la solución, disponer de una serie de datos concretos del producto. Estos datos serían:

1º.- Concentración crítica de iones cloruro a la que el inhibidor deja de ser efectivo y comienza la corrosión en el caso de este tipo de ataque.

2º.- En el caso de la penetración de la carbonatación a través del hormigón, que disminución es esperable en este fenómeno por la existencia del inhibidor, especialmente aminocarboxilatos y productos mixtos (inhibidor de la corrosión con sellantes e hidrofugantes); en el caso de inhibidores puros base aminoalcohol no es esperable.

3º.- Qué disminución en la velocidad de corrosión se espera tras producirse la despasivación, en todos los casos.

4º.- Tiempo que el sistema aplicado es funcional, entendemos que los productos aplicados hacen su trabajo durante un periodo de tiempo; en el caso de la molécula del inhibidor los plazos son de unos 50 años; si bien la aplicación más longeva de la que se está realizando un seguimiento de corrosión es de 1986, se trata de un puente en St. Paul, MN, USA en Randolph Street.

En el caso de los productos mixtos es importante destacar que esta durabilidad va muy ligada a la del sistema que sella exteriormente el hormigón, en el caso de hidrofugantes; dado que estos productos llevan un porcentaje de inhibidor tipo aminoalcohol alrededor del 20%, no podemos esperar los mismos resultados una vez se rompe el protector superficial que si hubiéramos añadido el producto puro y, por ello, este debe de ser reaplicado pasados estos periodos.

No olvidemos, además, que el tipo de inhibidor en el caso de sistemas mixtos es siempre un aminoalcohol; hemos rebajado su efectividad al disminuir su concentración, por lo que, evidentemente, no podemos esperar más que una mejora en comparación con un inhibidor puro de esta misma base química (desde el punto de vista de actuación como inhibidor de la corrosión).

En el caso de mineralizadores la función de sellado no presenta un problema de durabilidad (generalmente los existentes penetran hasta 3,8 cm sellando en torno a un 50 % y su durabilidad es muy alta), pero igualmente el porcentaje de inhibidor es de un 20 % y se trata de aminoalcoholes.

10. Uso conjunto de protección catódica e inhibidores

Condiciones de aplicación

Para llevar a cabo una correcta protección anticorrosiva duradera puede ser necesario el uso de varios métodos diferentes de protección de forma simultánea, por lo que es clave conocer la compatibilidad entre los diversos métodos y las condiciones para usarlos de forma conjunta o separada.

Tal es lo que ocurre con el uso de inhibidores de corrosión migratorios y la protección catódica, que son sistemas compatibles, ya que el flujo de corriente proporcionado por la protección catódica a lo largo del tiempo no daña la estructura del film monomolecular quimiadsorbido, pues no reduce ni oxida electroquímicamente el compuesto que proporcionan los inhibidores de corrosión migratorios, pero la existencia de tal corriente eléctrica hace necesario evaluar dónde y cómo usarlos conjuntamente.

Como cuestión preliminar es importante señalar que los inhibidores migratorios no se pueden aplicar en estructuras sumergidas, donde sin embargo la protección catódica puede ser una medida altamente recomendable.

Hay tres elementos principales, desde el punto de vista técnico, a evaluar para su aplicación conjunta o separada y que corresponden a:

- la durabilidad demandada de la protección.
- la facilidad de aplicarla ya que la protección catódica es más compleja.
- el umbral de contaminantes al que se quiere contrarrestar; si bien la protección catódica puede funcionar con cualquier nivel de cloruros, no es así en el caso de inhibidores migratorios.

Ya se ha explicado cómo funcionan cada uno de los métodos por separado, por lo que a continuación se explican solo los aspectos de su aplicación conjunta. Sin embargo, sí es necesario resaltar algunos aspectos de su forma de funcionar pues influyen en la acción conjunta.

Así, :

- en el caso de los inhibidores de corrosión migratorios actúan a modo de filmógeno aislando el medio (electrolito) de la armadura metálica, mediante la formación de una capa monomolecular.
- la protección catódica por su parte, necesita de un contacto entre el electrolito y el metal a proteger para hacer su función.

En el caso pues de aplicación conjunta el primer protector será el inhibidor de corrosión y la corriente protectora que pueda aportar la protección catódica será para proteger aquellas zonas dónde no se haya formado el filmógeno o dónde se dañe con el tiempo. La presencia del inhibidor con su film protector hace requerir menos corriente de protección.

Es un caso similar a lo que ocurre cuando se usa protección catódica con recubrimientos o capas semiprotectoras sobre la superficie metálica. Este último es el caso que ocurre en aguas de enfriamiento duras que la formación de cal (carbonato cálcico) disminuye la necesidad de corriente, e igualmente pasa en depósitos con fluidos en los que se usan recubrimientos. La protección catódica comienza a ser efectiva y aumenta su demanda de corriente cuando esos recubrimientos se deterioran o no son completamente protectores.

En resumen, cuando se aplican ambos métodos inicialmente la corriente necesaria de protección catódica será menor y, con el tiempo, comenzará a aumentar a medida que la concentración de la sustancia agresiva supere la concentración crítica de los inhibidores.

Suponiendo que ambos sistemas son adecuados para su aplicación conjunta, es necesario distinguir 4 casos:

Tabla 9. Casos para la aplicación conjunta de Protección catódica e Inhibidores de corrosión.

CASO	CONDICIONES	APLICACIÓN
1	Durante el periodo de vida considerado, nunca se va a alcanzar la concentración crítica del despasivante que pueda superar la del inhibidor de corrosión, es decir, el inhibidor de corrosión sigue activo durante todo el periodo de diseño Los ánodos de sacrificio van a permanecer activos durante todo el periodo de diseño	Cualquier inhibidor migratorio y cualquier tipo de protección catódica
2	Durante el periodo de vida considerado nunca se va a alcanzar la concentración crítica del despasivante que pueda superar la del inhibidor de corrosión, pero el inhibidor de corrosión no permanece activo durante todo el periodo de diseño Los ánodos de sacrificio permanecen activos durante todo el periodo de diseño	Inhibidores migratorios con posibilidad de reaplicación y cualquier tipo de protección catódica Protección catódica
3	Durante el periodo de vida considerado sí se va a alcanzar la concentración crítica del despasivante que supera la del inhibidor de corrosión Los ánodos de sacrificio permanecen activos durante todo el periodo de diseño.	Inhibidores con protección catódica con aumento progresivo de la corriente
4	Durante el periodo de vida considerado sí se alcanza la concentración crítica del despasivante que supera la del inhibidor de corrosión Los ánodos de sacrificio no permanecen activos durante todo el periodo de diseño	Protección catódica con incremento paulatino de la corriente e inhibidores de corrosión replicables

[3] **UNE-83704** Hormigón. Materiales de reparación. Método de los Índices de Reparación (RIM) para la selección de la técnica óptima de reparación y su seguimiento después de reparar.

11. Elección del método de reparación

Criterios de selección del método más apropiado - Método RIM

La elección del método óptimo de reparación no es un ejercicio fácil dadas las diversas alternativas existentes y la especificidad de cada caso. El usuario cuenta en primer lugar, para la elección del sistema de reparación más adecuado, con la identificación de una serie de "principios" que son descritos en la norma EN 1504. Su aplicación a las diversas opciones no es inmediata. Por ello en el presente capítulo se describe otro método que tiene un objetivo pedagógico, pues ayuda a la elección del sistema más adecuado según los baremos y los requisitos que el propio usuario establezca. Una vez establecidos entre las diversas alternativas, los criterios los debe mantener para que su elección sea objetiva.

El método de Índices de Reparación (RIM: Repair Index Method según sus siglas en inglés), se basa en una selección multicriterio para elegir una técnica de reparación entre varias posibles en el que se optimiza la selección mediante la definición de requisitos y la adjudicación de "pesos" entre 1 y 4 que se aplican a cada requisito. En la actualidad es una norma experimental UNE-83704. Se trata de una "herramienta" simple y flexible para su adaptación a cada tipo de usuario, siendo más una metodología de raciocinio que un método cerrado. El método RIM También puede ser una herramienta para el seguimiento de la estructura una vez reparada.

Finalmente, el usuario tiene la posibilidad de realizar un "análisis del ciclo de vida" si tiene la forma de monetizar todas las alternativas, ya que este análisis cuantifica en términos económicos.

Método del RIM: Repair Index Method

Consiste en describir una serie de Requisitos que se calificarán mediante "Indicadores"(PI) que se valoran con pesos de 1 a 4 (véase Tabla 10) para cada caso y luego se divide la suma total por el número de Indicadores utilizados, de tal manera que cada método de reparación queda valorado por un Índice (Repair Index-RI) de 1 a 4.

$$RI_{xx} = \frac{\sum PI_{xx}}{número\ de\ PI} \qquad [x]$$

Los requisitos pueden ser de distinto tipo, entre los que destacan (véase la Tabla 10):

- la durabilidad del método.
- su contribución a la estabilidad estructural.
- su capacidad como barrera.
- la dificultad de ejecución del trabajo.
- los aspectos de higiene y salud de los trabajadores y del método en sí mismo.
- el coste.
- la estética final.

Tabla 10. Ejemplos de Niveles, Indicadores y Requisitos

REQUISITOS RI	INDICADORES-PI	NIVELES			
		1	2	3	4
Vida útil y durabilidad	Vida útil normal de una reparación	>50 años	30-50 años	15-30 años	<15 años
Estabilidad y seguridad estructural	Consecuencias estructurales de los fallos	Leve	Moderado	Severo	Muy severo
Ejecución del trabajo	Control de la ejecución	Garantía de aseguramiento garantizado	Alto control y experiencia en aplicación	Método nuevo con experiencia en su aplicación	Método nuevo sin garantizar y sin experiencia en su aplicación
Ambiente, salud y sostenibilidad	Seguridad de trabajadores y usuarios Consumos de recursos Costes directos Coste de mantenimiento	Alto Muy bajo Muy bajo Muy bajo	Moderado Bajo Bajo Bajo	Bajo Moderado Moderado Moderado	Muy bajo Alto Alto Alto
Estética	Contribución estética	Muy interesante	Bastante interesante	Interesa	No interesa

Estos requisitos luego deben ser valorados en su porcentaje de importancia en el total de la reparación, de tal manera que la importancia total es 1 o el 100%, Un ejemplo se presenta en la Tabla 11. Finalmente se multiplica el Indicador de cada Requisito por su importancia (Im) y así de califica con el GRI (Global Repair Index) cada método de reparación de forma relativa.

$$GRI = \sum_{0}^{n=i}(I_m)(RI)_{xx} \qquad [x]$$

Tabla 11. Ejemplo de "Importancia relativa" de cada requisito

REQUISITO	IMPORTANCIA I_m (EN % POR UNIDAD)
RI_{str} de los requisitos de la estabilidad y seguridad estructural	0,1
RI_{exe} de los requisitos de la ejecución del trabajo	0,1
RI_{env} de los requisitos de ambiente, salud y sostenibilidad	0,1
RI_{ser} de los requisitos de vida útil y durabilidad	0,15
RI_{eco} de los requisitos económicos	0,5
RI_{est} Aspectos estéticos	0,05

Tabla 12. Comparación entre los diferentes sistemas de protección de las armaduras frente a la corrosión

	SAPC - PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS	ICCP – PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPUESTA	INHIBIDORES DE CORROSIÓN
Durabilidad (años)	De 20 a 40 años según el nivel de corrosión de la armadura y en condiciones óptimas de diseño	Hasta 40 años para la vida de los ánodos	De 5 a 20 años según el nivel de corrosión de la armadura
Requisitos de mantenimiento	No requieren mantenimiento	Mantenimiento constante (imprescindible)	No requieren mantenimiento
Consumo eléctrico	Sin consumo eléctrico	Consumo eléctrico constante (24 h/día 365 días/año)	Sin consumo eléctrico
Requisitos para la instalación	Empresa con personal cualificado en corrosión	Empresa con personal cualificado en corrosión	Empresa con personal cualificado en reparaciones de hormigón
Requisitos para el mantenimiento	N/A	Empresa con personal cualificado en corrosión	Empresa con personal cualificado en reparaciones de hormigón
Requisitos para el control de la eficacia	Empresa con personal cualificado en corrosión	Empresa con personal cualificado en corrosión	Empresa con personal cualificado en corrosión

Nota: no se realiza una comparación de costes porque depende de la particularidad de cada caso y proyecto objeto de estudio

12. Certificaciones que acreditan el nivel de competencia del personal en protección catódica

Al ser la protección catódica, sea por SAPC o ICCP, una técnica electroquímica aplicada a la industria o a la construcción deberán garantizarse unos estándares mínimos de formación específica para el personal de aplicación.

La norma UNE-EN ISO 15257 (2018); “Protección catódica. Niveles de competencia del personal de protección catódica. Bases para un esquema de certificación” trata de los niveles exigibles para el personal de protección catódica.

Una problemática importante en España es que no existen instituciones acreditadas de certificación para este personal, por lo que debe recurrirse a organismos internacionales, tipo NACE en los Estados Unidos, "Institute of Corrosion" en el Reino Unido, el CEFRACOR en Francia, entre otros.

Debe tenerse en cuenta que las certificaciones siempre son para el personal, nunca para las empresas a las que este personal pertenece. En los esquemas de certificación se diferencian claramente los aplicados a estructuras metálicas (enterradas o sumergidas, como por ejemplo los gasoductos de acero), los de aplicación en ambiente marino y aparte los de aplicación para el tratamiento en hormigón.

Al no existir posibilidad de certificación en España, es deseable que el personal a cargo de los diseños y control de las instalaciones disponga de certificación a nivel 2 (tipo "Corrosion Technician") como requerimiento mínimo básico, y que el personal de ejecución tenga por lo menos un nivel 1 (tipo "Corrosion Tester") para las instalaciones y tomas de mediciones al respecto, bajo supervisión de personal con certificación a nivel 2. Aumentar los requerimientos de personal certificado solamente provocará tener que acudir a mercados exteriores por falta de personal certificado en España.

13. Referencias

- UNE EN 1504-Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón.

- CONTECVET -A validated user's manual for assessing the residual life of concrete structures, DG Enterprise, CEC, (2001). El manual se puede descargar de forma gratuita desde: https://www.ietcc.csic.es/wp-content/uploads/1989/02/manual_contecvet.pdf

- Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland Ø, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B. (2004). "RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method." Materials & Structures 37(273): 623-643.

- UNE-83704 Hormigón. Materiales de reparación. Método de los Índices de Reparación (RIM) para la selección de la técnica óptima de reparación y su seguimiento después de reparar.

- Manual Corrosión de Armaduras -Manual IET 1990CSIC Madrid C. Andrade S. Feliu.

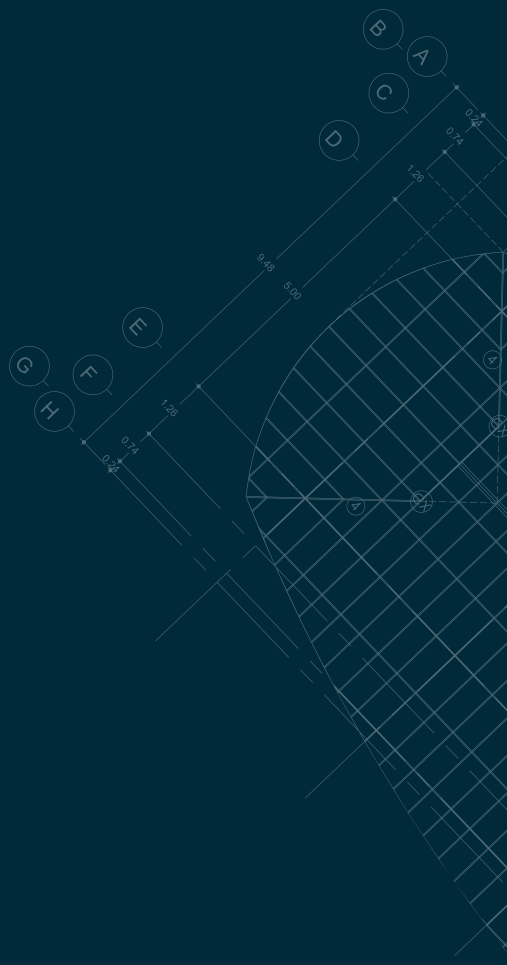
- Guía de Reparación de Estructuras de Hormigón en ambiente marino. Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPYC) 2018.

- GEHO Morteros de reparación - Grupo Español del Hormigón - diciembre 1989 - Boletín nº 4.

- UNE-EN ISO 12696 (2017). Protección catódica de acero en el Hormigón (ISO 12696:2016).

- "La protezione catodica galvanica" (Mapei-C.P. MK 838810 (I) 10/09).

- UNE 83704 Hormigón. Materiales de reparación. Método de los Índices de Reparación (RIM) para complemento en la selección de la técnica optima de reparación y su seguimiento después de reparar.


B
A
C
D
E
G
F
H
0.24
0.74
1.28
9.48
5.00
1.28
0.74
0.24