



Armaduras Galvanizadas en Estructuras de Hormigón

Una introducción para arquitectos, ingenieros y proyectistas

Contenido

Introducción	1
El coste de la corrosión	2
El proceso del galvanizado en caliente	2
La corrosión de las armaduras de acero sin recubrimiento	3
Carbonatación	3
Ataque por cloruros	4
El aumento de la vida útil del hormigón armado	4
¿Por qué galvanizar las armaduras es tan eficiente?	5
Formación de la película pasiva	5
Resistencia a la carbonatación	5
Resistencia al ataque por cloruros	6
La barrera de protección	6
Mínima alteración de la masa de hormigón	6
Protección de sacrificio	6
Fuerza de adhesión	7
Perfil de corrosión de la armadura sin revestimiento frente a la galvanizada	7
Ventajas de diseño	8
La especificación de una armadura galvanizada	8
El coste de la armadura galvanizada	9
Conformado, soldadura, reparación, manipulación, transporte y almacenamiento	9
Instalación y cobertura	10
Utilización conjunta de armaduras galvanizadas y sin galvanizar	10
Razones para utilizar armaduras galvanizadas en caliente	11
Referencias	12
Agradecimientos	12

Introducción

El galvanizado en caliente ha representado la mejor alternativa para prolongar la vida de las armaduras de acero en el hormigón en los últimos 100 años. En sus inicios, la forma más común de uso de las armaduras galvanizadas era en la construcción de tanques de agua de hormigón donde el alambre galvanizado se utilizaba para pretensar las paredes del tanque.

A partir de la década de 1950, el uso de armaduras galvanizadas se ha extendido en muchos países y ya en los 60 y principios de los 70 han sido en particular utilizadas en EEUU como solución para la construcción de puentes y carreteras. En Australia, el mayor uso de la armadura galvanizada se encuentra en el montaje de las losetas en espiga de la Opera de Sidney. Instaladas en 1963 se han preservado intactas hasta ahora sin signos de deterioro o corrosión.

En los últimos 25 a 30 años, se observa un paulatino incremento a nivel mundial del uso de armaduras galvanizadas en una gran variedad de construcciones de hormigón y en distintas condiciones de exposición. Un ejemplo lo encontramos en Nueva York, donde desde 1995 se han galvanizado todas las armaduras de los puentes de la Autoridad de Autopistas de Nueva York. Muchos puentes en EE. UU. son sometidos a pruebas periódicas para verificar el estado de las armaduras galvanizadas que se utilizaron en su construcción inicial y se ha comprobado que se encuentran en excelentes condiciones.

En Europa, las armaduras galvanizadas se han utilizado principalmente en entornos particularmente agresivos, como aplicaciones costeras, sistemas de alcantarillado, túneles de carreteras, etc. y para productos de construcción a medida en proyectos específicos.

Más allá de estas aplicaciones, el uso de armaduras galvanizadas puede resolver problemas técnicos, lograr diseños livianos y mejorar el diseño arquitectónico. Sin embargo y a pesar de sus múltiples beneficios todavía no se ha extendido su uso. Esto se debe al desconocimiento sobre sus ventajas: las armaduras de acero galvanizado son una solución muy eficaz conllevando a la vez ventajas económicas, técnicas y medioambientales, tanto para constructores como para fabricantes de prefabricados de hormigón.

Hoy en día, las armaduras galvanizadas en caliente son una solución rentable para eliminar los efectos de la carbonatación y retrasar significativamente la aparición de la corrosión por cloruros en entornos costeros e industriales. Las armaduras galvanizadas son también la mejor solución para fachadas exteriores, juntas de paneles prefabricados y elementos superficiales donde es esencial la ausencia de manchas de óxido y desconchado.

El creciente interés en el diseño de estructuras con armadura galvanizada se debe al éxito y buen rendimiento obtenido por este sistema constructivo.



El recientemente inaugurado Puente Mario M. Cuomo es el puente más largo construido en la ciudad de Nueva York. Este nuevo puente reemplaza al anterior Tappan Zee Bridge sobre el Río Hudson al norte de la ciudad.



La cubierta del Puente Mario M. Cuomo está formada por cerca de 6.000 paneles de hormigón prefabricado de 3,66m de largo por 6,7-13,7m de ancho, para los vanos de acceso y los 963 tableros de cubierta del vano principal. Los tableros están unidos mediante hormigón vertido alrededor de la armadura galvanizada (Imagen cortesía de Autoridad de Autopistas del Estado de Nueva York).



El puente de Saint-Nazaire fue construido en la década de 1970 y sigue siendo el puente más largo de Francia. La mayor parte de su armadura de hormigón no estaba protegida contra la corrosión, lo que provocó un extenso programa de mantenimiento y reparaciones. Se utilizaron alrededor de 63 toneladas de armadura galvanizada en lugares muy específicos: los refuerzos en los apoyos de las vigas en T y las losas de conexión vertidas in situ a la altura de los refuerzos (en la imagen de arriba). No han sido necesarias reparaciones en los lugares específicos donde se utilizó la armadura galvanizada.

El coste de la corrosión

Un estudio publicado en 2016 mostró que el coste global de la corrosión en 2013 ascendía a 2.16 billones de €, lo que corresponde a aproximadamente el 3,4% del producto interior bruto (PIB) mundial. El estudio, que examinó el impacto en la economía real de la corrosión y su gestión, reveló que el uso de "las mejores prácticas" destinadas a prevenir problemas de corrosión conllevaría ahorros efectivos de entre un 15 y un 35% anual, es decir de 324 a 755 mil millones de € cada año.



El proceso del galvanizado en caliente

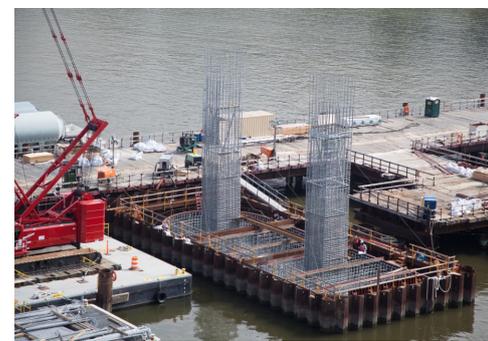
El proceso de galvanizado en caliente se inicia con la limpieza superficial de los elementos de acero a galvanizar, sumergiéndolos en una serie de tanques de pretratamiento. Una vez limpio, el acero se sumerge inclinado en un baño de zinc fundido. El zinc fundido reacciona con el acero para formar el revestimiento galvanizado (mediante reacción metalúrgica). Las varillas barras de acero corrugado se pueden galvanizar en lotes (por ejemplo, mediante el uso de gaviones especiales). Además, las mallas de refuerzo que se utilizan para hacer las armaduras se cuelgan generalmente de unos utilajes sumergiéndose en el baño de zinc fundido.



El puente Mario M. Cuomo es un puente atirantado de dos tramos de 5 km de largo y 8 carriles diseñado con armaduras galvanizadas para alcanzar una vida útil mínima de 100 años.



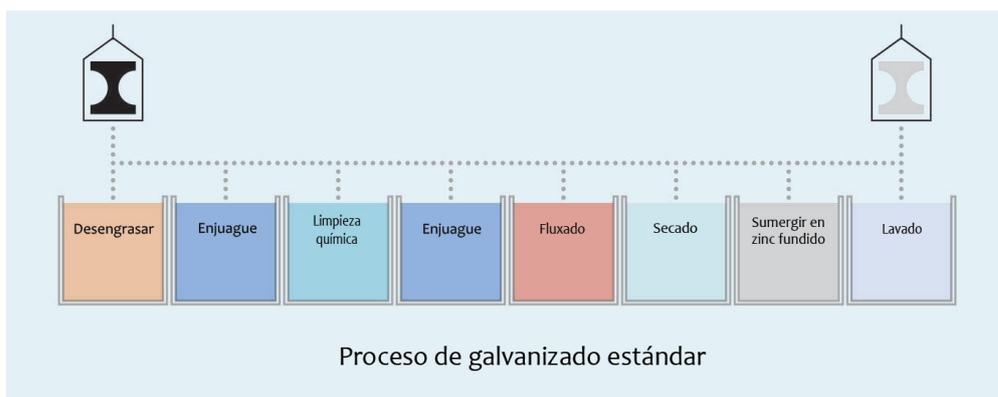
Antes de elegir armaduras galvanizadas para el Puente Mario M. Cuomo, la Autoridad de Autopistas de Nueva York desarrolló un Plan de Protección contra la Corrosión para identificar la exposición, los mecanismos de degradación, las estrategias de diseño y construcción y los costes del ciclo de vida.



Más de 27.000 toneladas de armadura galvanizada garantizan la máxima durabilidad de las torres del vano principal, los pilares del tramo de acceso, los estribos y los tableros de la plataforma del puente Mario M. Cuomo.

La corrosión implica costes significativos para la sociedad

Con el uso de mejores prácticas para prevenir la corrosión, los ahorros anuales podrían encontrarse entre los 324 y 755 mil millones de €



La galvanización es la inmersión de acero limpio en un baño de zinc fundido que se adhiere metalúrgicamente proporcionando la máxima durabilidad

La corrosión de las armaduras de acero sin recubrimiento

El entorno altamente alcalino del hormigón permite que la armadura convencional de acero sin recubrimiento desarrolle una película de óxido de hierro pasiva y estable en su superficie, que protege al acero de la corrosión. Sin embargo, el hormigón es un material no homogéneo, compuesto principalmente por los productos de hidratación del cemento (pasta de cemento), arena y áridos. La porosidad inherente del hormigón curado, proporciona una vía para la difusión de especies gaseosas y acuosas que, con el tiempo, pueden romper la pasividad del acero e iniciar la corrosión. La corrosión comienza cuando se despasiva la capa protectora de óxido de la superficie, lo cual puede ocurrir de manera independiente por los mecanismos 1 o 2:

1. Carbonatación del hormigón
2. Corrosión inducida por cloruros.

El óxido que se produce en las armaduras sin galvanizar tiene un volumen 7 veces mayor que el hierro que consume en su formación por corrosión, provocando la formación de grietas que se propagan por el hormigón



Agrietamiento y desmenuamiento del hormigón debido a la corrosión de la armadura



Agrietamiento y desmenuamiento del hormigón debido a la corrosión de la armadura

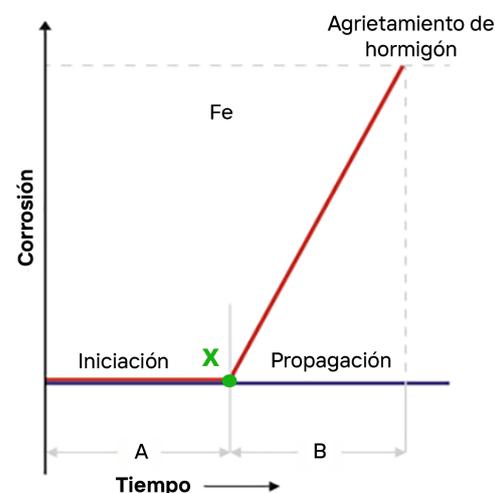
Agrietamiento y desmenuamiento del hormigón debido a la corrosión de la armadura

El proceso de corrosión de la armadura de acero sin protección se muestra en la siguiente gráfica del modelo adaptado de Tuutti, donde:

- A. La etapa de iniciación: el período en el que la armadura de acero se mantiene pasivada (hasta el punto x).
- B. La etapa de propagación: se produce la destrucción de la capa pasiva del acero de la armadura y esta comienza a corroerse activamente. Es al final de esta etapa, cuando se produce el agrietamiento y desmenuamiento del hormigón.

El proceso de corrosión se inicia habitualmente mediante la neutralización del área que rodea la armadura de acero, p. Ej. carbonatación, o activación de la superficie por aniones fuertemente corrosivos, p. ej. cloruros. El tiempo que pasa hasta que se inicia el proceso de corrosión está determinado por la concentración y la velocidad de transporte de sustancias que penetran en la cubierta de hormigón y por el umbral de concentración requerido para que comience la corrosión.

Esquema de la corrosión de la armadura en hormigón, según Tuutti 1982 Agrietamiento de hormigón



Carbonatación

La carbonatación es un proceso natural que ocurre cuando se neutraliza la alcalinidad del hormigón debido a la reacción con el dióxido de carbono atmosférico. Con el tiempo, el frente de carbonatación migra a través de la masa de hormigón, reduciendo finalmente los niveles de pH. A medida que desciende el pH del hormigón, el acero de la armadura se vuelve más susceptible a la corrosión.

El proceso de carbonatación se caracteriza por:

- La carbonatación ocurre más lentamente en las zonas profundas del hormigón.
- La profundidad de carbonatación depende de la permeabilidad del hormigón y de sus grietas, huecos y poros.

- Una vez que el pH del hormigón desciende a menos de 11,5, la armadura de acero comenzará a corroerse
- El efecto y la velocidad de neutralización son más fuertes cuando el dióxido de azufre (SO₂) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) reaccionan con el agua para formar soluciones altamente ácidas. Estas sustancias se encuentran en mayor concentración en áreas industriales.

Según mediciones de campo, la calidad del hormigón es fundamental para reducir los efectos de la carbonatación. Las pruebas han revelado que:

- En hormigón estructural de buena calidad, tras de 20 años de exposición atmosférica, se

observa carbonatación solo en los primeros 5 -10 mm (por ejemplo, elementos estructurales de edificios en un entorno urbano)

- En hormigón de baja calidad, en un plazo de 5 a 8 años, se pueden observar ya muros de 200 mm de espesor completamente carbonatados a ambos lados.

Ataque por cloruros

La corrosión inducida por cloruros es la principal causa en todo el mundo del deterioro de las armaduras de acero y el consiguiente daño a las estructuras de hormigón. Los iones de cloruro pueden migrar a través del hormigón y acumularse hasta provocar la despasivación de la película protectora en la superficie de la armadura, iniciando así la corrosión. Los iones cloruro activan la superficie del acero para formar un ánodo y la superficie pasivada restante actúa como cátodo.

Posteriormente, los iones de cloruro atacan el óxido ferroso, formando complejos que se separan del acero y se oxidan. Los átomos de hierro recién expuestos forman más óxidos ferrosos, continuando así el proceso de corrosión.

Los cloruros entran en el hormigón a través de:

- Áridos contaminados, arenas marinas y aditivos
- Agua salobre o salada utilizada para mezclar y / o curar
- Exposición a ambientes marinos y costeros
- Uso de sales de deshielo

Con el tiempo, los cloruros migran por difusión a través del hormigón aumentando así la concentración de cloruro en la superficie de la armadura. La armadura de acero sin recubrimiento puede comenzar a corroerse cuando la concentración de cloruros en el cemento se encuentra en un rango de 0,2 a 0,4% (o 0,6 kg / m³ de hormigón).



Degradación de la armadura y el hormigón en un ambiente con alta concentración de cloruros (costero)

La corrosión inducida por cloruros es la principal causa de deterioro de las armaduras de acero.

El aumento de la vida útil del hormigón armado

Es bien conocida la necesidad de incorporar la durabilidad de las estructuras de hormigón en su diseño, construcción y mantenimiento para evitar su deterioro prematuro.

Una adecuada selección y utilización de materiales, procesos de diseño y métodos constructivos permitirá maximizar y garantizar la vida útil de la estructura según las especificaciones del cliente, evitando necesidades de mantenimiento prematuras e inesperadas.

El análisis técnico determinará la naturaleza y la tasa de deterioro de los materiales en determinadas condiciones macro y microambientales, permitiendo planificar el diseño, la construcción y el mantenimiento de una estructura de hormigón durante su vida útil.

Por lo general, hay 3 formas de prevenir la corrosión del acero en el hormigón:

1. Modificar el hormigón mediante

- Adiciones cementosas complementarias (por ejemplo, cenizas volantes, escoria y humo de sílice)
- Impregnación (por ejemplo, con polímeros)
- Inhibidores (por ejemplo, nitratos)
- Capas de barrera (por ejemplo, membranas y pinturas)

2. Modificar el acero de refuerzo

- Armaduras de acero recubierto (por ejemplo, acero galvanizado)
- Metales resistentes a la corrosión (por ejemplo, acero inoxidable)
- Materiales no metálicos (por ejemplo, polímeros reforzados con fibras o fibra de vidrio)
- Protección catódica (por ejemplo, ánodos de sacrificio y corrientes impresas)

3. Aumento del recubrimiento de hormigón

El aumento del recubrimiento de hormigón incrementa el tiempo que tarda el frente de carbonatación en alcanzar la armadura de acero y con ello, el tiempo necesario para que la concentración de cloruro en la superficie del acero alcance un nivel crítico.

Sin embargo, hay una paradoja al considerar este enfoque, ya que cuanto más gruesa es la cubierta de hormigón, mayor es el valor máximo de la presión expansiva provocada por la corrosión de la armadura y en consecuencia, mayores serán las grietas.

Estos 3 métodos pueden usarse individualmente, o junto con otros métodos y cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes. El enfoque adoptado dependerá de la situación particular, el entorno y la esperanza de vida requerida al elemento constructivo.



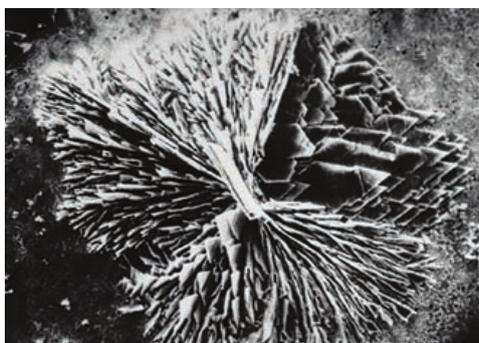
Los pontones flotantes del puerto deportivo de Sandringham, Victoria (Australia) con armadura galvanizada

La galvanización protege contra la corrosión a largo plazo y permite cubiertas de hormigón más delgadas, lo que ahorra recursos y costes

¿Por qué galvanizar las armaduras es tan eficiente?

Formación de la película pasiva

Al igual que la armadura de acero sin recubrimiento, la armadura galvanizada también forma una capa protectora pasivante en el hormigón. El zinc en soluciones fuertemente alcalinas (pH 12,5 - 13,2) se pasiva mediante la formación de una capa de cristales adherentes de hidroxincato de calcio - $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Esta reacción comienza inmediatamente al entrar en contacto con el cemento húmedo, formando una película superficial que estabiliza el zinc y lo aísla del entorno circundante. Los productos finales de la pasivación son cristales de CaHZn que aparecen en la superficie de la armadura galvanizada.

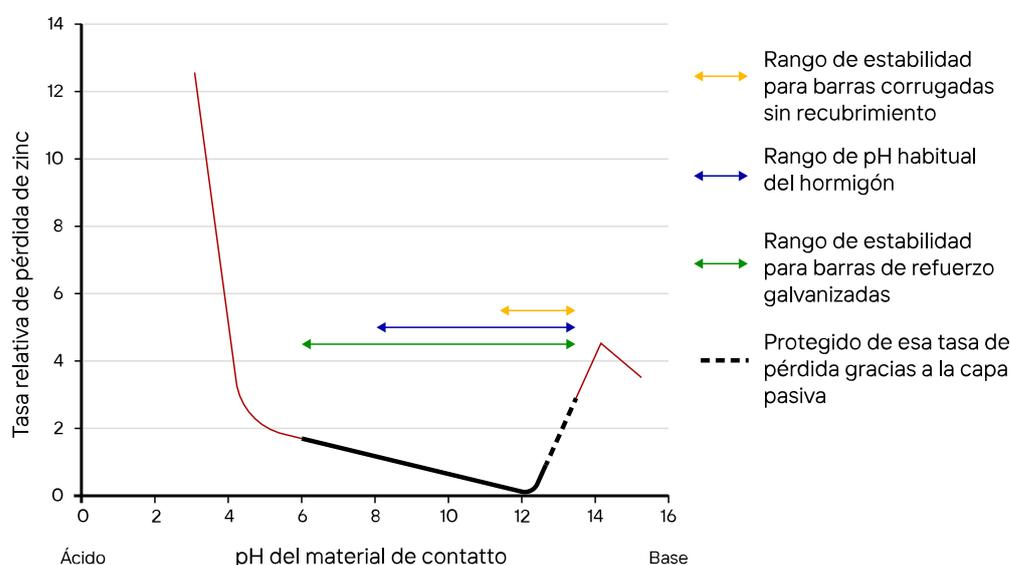


Cristales de CaHZn tras 24h en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con pH 12,6

Al formar la capa pasiva, se consumen aproximadamente $10 \mu\text{m}$ de la capa exterior de zinc puro original (Eta) del revestimiento, lo cual representa una mínima proporción del revestimiento total. La reacción con el zinc cesa una vez que el hormigón se endurece y, después de 28 días, cuando ha desarrollado su adherencia normal y resistencia a la compresión, la formación de la capa de hidroxincato de calcio da como resultado que el acero de la armadura galvanizada desarrolle una mayor adherencia y un menor deslizamiento por carga más reducido que el de una armadura sin recubrimiento.

Esta capa pasivante y sus propiedades son fundamentales para la eficacia de la armadura de acero galvanizado, particularmente su estabilidad química a pH neutro y a altas concentraciones de cloruro.

Las armaduras galvanizadas pueden desarrollar una mayor capacidad de adherencia que sin galvanizar



- ←→ Rango de estabilidad para barras corrugadas sin recubrimiento
- ←→ Rango de pH habitual del hormigón
- ←→ Rango de estabilidad para barras de refuerzo galvanizadas
- Protegido de esa tasa de pérdida gracias a la capa pasiva

Rango de estabilidad del pH de la armadura en el hormigón

Resistencia a la carbonatación

El recubrimiento galvanizado en caliente mantiene una tasa de corrosión muy baja en un amplio rango de valores de pH (pH 6 - 12,5). Debido a esto, las armaduras galvanizadas permanecen estables a medida que el nivel de pH del hormigón cae debido a la carbonatación. Por el contrario, el acero de refuerzo sin recubrimiento solo es estable en un rango pequeño (pH 11.5 - 13.2) y comenzará a corroerse una vez que el nivel de pH del hormigón descienda de 11.5. En hormigones con un pH entre 12.5 y 13.2, la armadura galvanizada está protegida por la formación de la capa pasiva de hidroxincato de calcio, lo cual evita pérdidas de zinc en ambientes altamente alcalinos.

Con el tiempo, el frente de carbonatación migra a través de la masa de hormigón, reduciendo finalmente el pH a niveles casi neutros (pH 7). Como ilustra la figura, la armadura galvanizada no se ve afectada por la carbonatación del hormigón.

Resistencia al ataque por cloruros

Una armadura galvanizada tiene una mayor resistencia al ataque de cloruros que sin galvanizar.

Investigaciones recientes (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej y Chmiela, 2020) indican que: *“Los resultados obtenidos en ensayos de corrosión (LPR, EIS) y estructurales (SEM, EDS) en probetas de hormigón armado con acero B500SP, demostraron que el recubrimiento con zinc tiene un efecto muy positivo al proporcionar una protección eficaz contra la corrosión en entornos con cloruros”.*

El umbral crítico de cloruros a partir del cual la armadura de acero sin galvanizar tiene un 20% de probabilidad de iniciar su corrosión es del 0,06% en peso de hormigón. La armadura galvanizada puede tolerar concentraciones de cloruro mucho más altas debido a la estabilidad de la película de hidroxocincato de

calcio. Aunque no existe un acuerdo universal la literatura existente indica que las armaduras galvanizadas admiten un umbral de cloruros 2 a 6 veces mayor que sin galvanizar. En general se acepta que, de un modo conservador, las armaduras galvanizadas tienen un umbral crítico de cloruros de 2 a 2,5 veces mayor que las armaduras sin protección.

Además, la velocidad de difusión del cloruro a través del hormigón no es constante, se ralentiza con el tiempo, por lo que, en términos prácticos, cuanto más alto sea el umbral crítico de cloruros de una armadura, mayor será el tiempo necesario para que se inicie la corrosión. En el caso de la armadura galvanizada se observa que este tiempo es como mínimo el doble y algunos estudios indican que puede ser hasta 10 veces mayor.

El ataque de cloruros es la mayor causa de daño a nivel mundial de las estructuras de hormigón armado en infraestructuras, por ello, es importante considerar alternativas que maximicen su durabilidad. La galvanización en caliente es un método simple y rentable para mejorar la resistencia a los cloruros y la durabilidad de las estructuras de hormigón. Su rendimiento se puede modelizar utilizando modelos convencionales de difusión de cloruros. Algo importante a tener en cuenta es que los modelos deterministas de difusión de cloruros solo calculan el tiempo hasta que se inicia la corrosión, sin tener en cuenta el espesor del recubrimiento galvanizado. Al considerar la fase de propagación de la corrosión, durante la cual el revestimiento galvanizado se corroe a un ritmo más lento que el acero, la durabilidad aumenta aún más.

La barrera de protección

Otra ventaja que ofrece el recubrimiento de zinc de la armadura galvanizada es que el proceso de galvanizado en caliente proporciona una cobertura completa de todas las superficies. Esta barrera de protección mediante unión metalúrgica actúa como defensa adicional entre el acero y la atmósfera. Esto, junto con la excelente resistencia a la abrasión y dureza del recubrimiento, lo hace ideal para proteger la armadura durante su transporte e instalación en obra.

Mínima alteración de la masa del hormigón

Si se inicia la corrosión del recubrimiento galvanizado, el proceso de corrosión entra en la fase de propagación. Los productos de corrosión de zinc resultantes son finos y en forma de polvo, expandiéndose en volumen solo 1,3 veces el volumen original de zinc, mientras que en el caso de una armadura sin galvanizar el óxido se expandirían hasta 7 veces.

Los productos de corrosión del zinc también son más solubles en el agua alcalina de los poros y se difunden desde la armadura hacia la matriz de hormigón, a diferencia de los productos de corrosión del hierro que no migran de la armadura hasta después de que se ha

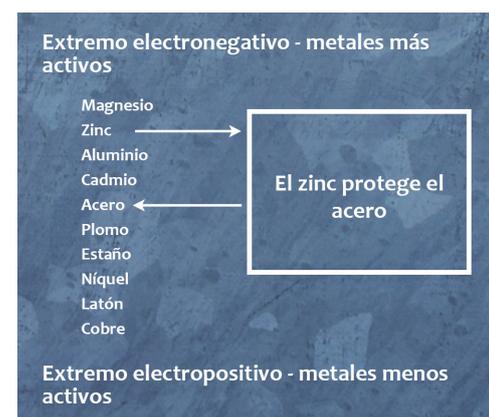
producido el agrietamiento del hormigón. Esto evita la acumulación de presiones internas que provocan el agrietamiento y el desconchado del hormigón. Además, la incorporación a la matriz de hormigón de los productos microscópicos de corrosión disminuye su permeabilidad al rellenar poros y huecos, lo que ralentiza el paso de los elementos agresivos desde la superficie del hormigón a la armadura. El resultado de este proceso es un aumento significativo de la fase de propagación de la corrosión con el correspondiente retraso en el inicio de la fisuración del hormigón.

Protección de sacrificio

La serie galvánica de metales es una lista de metales y aleaciones organizados de acuerdo con sus potenciales relativos en cada entorno. La imagen de la derecha muestra una serie de metales dispuestos en orden de actividad electroquímica en el agua de mar (el electrolito). Los metales están ordenados de arriba hacia abajo según su capacidad de sacrificio; los metales de la parte superior de la escala proporcionan protección catódica o de sacrificio a los metales que están abajo.

El zinc es anódico al acero. Por tanto el revestimiento galvanizado proporcionará protección catódica al acero. Cuando el zinc y el acero se conectan en presencia de un electrolito, el zinc se consume lentamente mientras el acero se mantiene protegido. La acción de sacrificio del zinc ofrece protección al acero en caso de que se produzcan daños durante la manipulación o el montaje.

El Zinc protege el acero

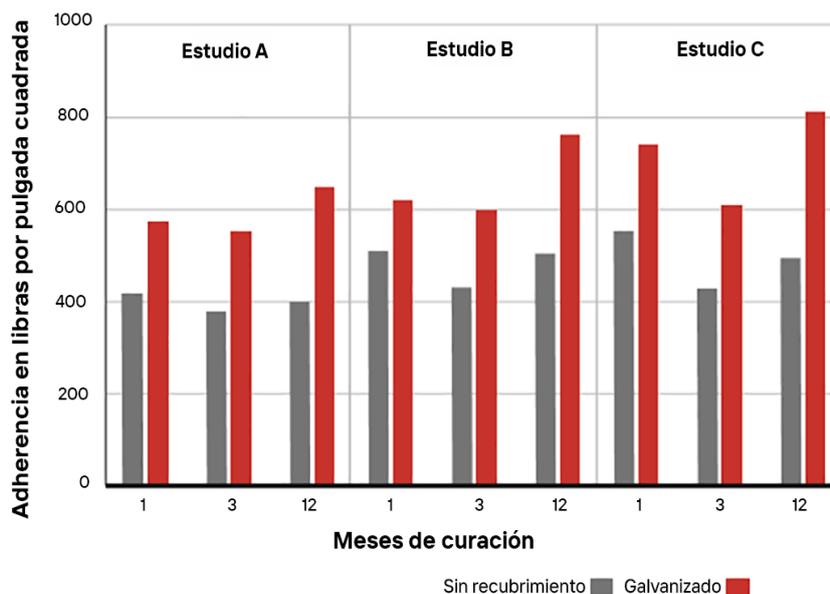


Posición del Zinc en la serie galvánica

Fuerza de adhesión

Existen pruebas extensas que indican que la adherencia entre una armadura galvanizada y el hormigón es mayor que con una armadura sin galvanizar.

La fuerza de adherencia está estrechamente relacionada con la formación de la película pasiva de hidroxidato de calcio y, aunque algunos ensayos acelerados indican que la fuerza de unión de la armadura galvanizada es inferior a la de la armadura sin recubrimiento, este efecto solo dura las primeras 1 o 2 semanas y está relacionado con la reacción inicial del zinc a condiciones altamente alcalinas. Tras 28 días, cuando el hormigón ha desarrollado su adherencia y resistencia a la compresión habituales, la armadura galvanizada desarrollará una mayor capacidad de adherencia en comparación con la armadura sin galvanizar. Esto se debe a la precipitación de la película de hidroxidato de calcio en la interfase armadura / hormigón.



Resultados de la prueba comparativa de adherencia entre armaduras galvanizadas y sin galvanizar. (Fuente: Universidad de California)

Perfil de corrosión de la armadura sin revestimiento frente a la galvanizada

El siguiente esquema compara el rendimiento de la armadura galvanizada en el hormigón respecto a la armadura sin galvanizar.

La armadura galvanizada tiene un umbral crítico de cloruros más alto y es inmune a los efectos de la carbonatación, por ello el inicio del proceso de corrosión se retrasa (cambia el punto x al punto y). La protección de barrera que ofrece el zinc, combinada con la escasa alteración que provocan sus productos de corrosión, sirven para alargar la fase de propagación del proceso. A continuación, se describe cada etapa del proceso de corrosión:

A. La etapa de inicio: el período en el que el hormigón se expone progresivamente a productos corrosivos (cloruros / carbonatación) y la armadura sin recubrimiento permanece pasivada (hasta el punto x). El tiempo que pasa hasta que se inicia la corrosión se puede cuantificar mediante modelos deterministas de carbonatación y difusión de cloruros (solo para armaduras sin recubrimiento) basados en la Segunda Ley de Fick.

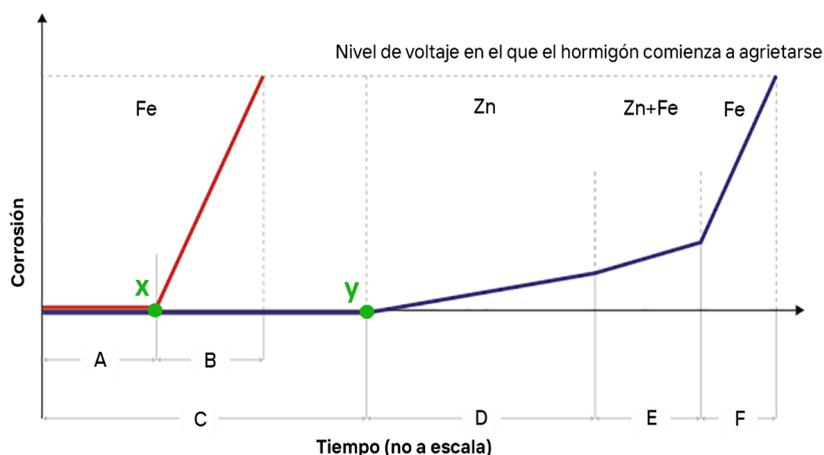
B. La etapa de propagación: destrucción de la capa pasivante de la armadura sin recubrimiento y corrosión hasta el límite aceptable de deterioro del hormigón. Al final de esta etapa se produce el agrietamiento y desconchado del hormigón.

C. Vida útil de la capa pasivante de la armadura galvanizada. La etapa de inicio de la corrosión se prolonga debido a una mayor tolerancia al ataque de cloruros y a la ausencia total de despasivación de la armadura por la carbonatación del hormigón.

D. Período de protección de la armadura galvanizada contra la oxidación cuando los cloruros atacan una pequeña porción de la capa de zinc puro en la superficie del acero y los productos de corrosión se diseminan lejos de la armadura.

E. Período de protección adicional en el que la corrosión provoca la disolución de las capas de aleación de FeZn.

F. En esta etapa se ha consumido ya todo el recubrimiento galvanizado y la velocidad de corrosión de la armadura se vuelve idéntica a la de la etapa B para el acero sin recubrimiento; sin embargo, en esta etapa el galvanizado ha hecho ya su trabajo, retrasando el inicio del agrietamiento del hormigón.



Modelo esquemático de la corrosión de la armadura galvanizada en hormigón, según Tuutti 1982

Ventajas de diseño

El revestimiento galvanizado en caliente de la armadura proporciona un aumento significativo de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. La formación de una película pasiva de hidroxidato de calcio sobre la superficie de la armadura galvanizada aumenta significativamente el umbral crítico de cloruros del acero, retrasando así significativamente el inicio de la corrosión. Este retraso en el inicio de la corrosión puede cuantificarse utilizando modelos deterministas de difusión de cloruros convencionales, basados en la Segunda Ley de Fick.

El tiempo hasta el inicio de la corrosión aumenta aún más, ya que la armadura galvanizada es inmune a los efectos de la carbonatación. Si la armadura galvanizada se despasiva, los productos de corrosión del zinc resultantes son mucho menos voluminosos que los productos de corrosión del hierro formados sobre una armadura sin revestir, provocando por tanto una mínima ruptura de la masa de hormigón. Esto evita la acumulación de presiones internas que provocan el agrietamiento y el desconchado del hormigón.

La adición de los productos microscópicos de corrosión de zinc a la matriz de hormigón disminuye su permeabilidad al llenar los poros y huecos, lo que ralentiza la entrada de sustancias agresivas desde la superficie del hormigón a la armadura. El resultado de este proceso es un aumento significativo de la fase de propagación de la corrosión con el correspondiente retraso del proceso de fractura del hormigón.



Vigas de soporte de hormigón armado con acero galvanizado en caliente para los balcones de un elegante apartamento en Génova. Se eligieron armaduras de acero galvanizado para preservar mejor en el tiempo las vigas de soporte de los balcones y protegerlas del smog, la lluvia, las heladas y la humedad. (Imágenes cortesía de Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

El revestimiento galvanizado en caliente aumenta significativamente la durabilidad de las estructuras de hormigón armado

La especificación de una armadura galvanizada

Las especificaciones relativas a las armaduras galvanizadas se encuentran en la norma EN 10348-2: 2019 (Acero para el armado del hormigón. Acero galvanizado para armaduras. - Parte 2: Productos de acero galvanizado para armaduras.). La norma EN 10348-2 establece requisitos para las Armaduras galvanizadas fabricadas a partir de barras de acero corrugado que cumplen los requisitos de EN 10080.

Los requisitos para la galvanización de las barras están de acuerdo con la norma internacional para el galvanizado general - EN ISO 1461, con la excepción de que los requisitos de espesor del revestimiento para las armaduras se definen específicamente según se indica en la tabla de la derecha.

La norma EN 10348-2 también asegura que la geometría de la corruga (altura de la corruga o profundidad de la muesca) se mantiene adecuadamente tras su galvanización. Para evitar posibles efectos sobre las propiedades mecánicas, la norma establece diámetros mínimos de curvatura para las barras que se curvan antes de la galvanización.

Requisitos de espesor del recubrimiento según EN 10348-2:2019

Diámetro de acero (mm)	Masa del revestimiento (g / m²)	Espesor de revestimiento (µm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

El coste de la armadura galvanizada



En el Proyecto de Vivienda Zac Seguin en el Oeste de París, se utilizó armadura galvanizada en los balcones estilo jardinera de hormigón blanco prefabricado. Esta solución se eligió para garantizar la ausencia de manchas de óxido que pudieran alterar con el tiempo la apariencia de los elementos blancos de hormigón prefabricado. El uso de armadura galvanizada permitió también reducir la cubierta de hormigón, logrando así un diseño mejorado más ligero. (Imágenes cortesía de Aldric Beckmann Architectes / Françoise N'Thépé Architecture & Design.Paris)



El coste global de las armaduras de acero galvanizado en construcción con hormigón depende en gran medida del nivel de utilización en toda la estructura. Por ejemplo, rara vez es necesario galvanizar el núcleo estructural o los elementos internos de un edificio de gran altura o los componentes integrados profundamente de grandes estribos y cimientos. En estas situaciones, puede ser necesario galvanizar solo la armadura de los elementos superficiales expuestos o donde los cimientos puedan verse afectados por aguas subterráneas agresivas o que fluctúen.

De modo general, en construcción de edificios se estima que el galvanizado de la estructura incrementa aproximadamente un 6-10% el coste del hormigón, dependiendo del tamaño y tipo de acero utilizado, el precio de galvanizado y la cantidad de acero por metro cúbico de hormigón. En promedio el coste de la armadura no representaría más del 25% del coste total del hormigón armado. Teniendo en cuenta que el coste del armazón estructural y la fachada de un edificio normalmente representan en torno a un 25 - 30% del total de la construcción, el coste añadido de galvanizar es tan solo un 1,5 - 3,0%.

Este incremento se reduciría a un 0,5-1,0% si se galvanizan solo los paneles superficiales. Sin embargo, cuando se compara con el coste total del proyecto o el precio final de venta, el coste adicional de galvanizar se reduce bastante, representando en la mayoría de los casos como máximo un 0.1-0.2%.

El profesor Richard Weyers, Virginia Tech University, realizó un análisis en 2017 sobre la difusión de cloruros en las cubiertas de hormigón y sus efectos en la vida útil de armaduras revestidas con epoxi, galvanizadas y de acero inoxidable 316LN en Virginia, EE. UU. Las cifras del coste total y del coste del ciclo de vida mostraban que la armadura galvanizada proporciona la protección más rentable para los forjados de puentes, alcanzando una vida útil de 100 años. Cuando se analizan los costes y las consecuencias de los daños por corrosión en un edificio de hormigón armado, la inversión adicional en el galvanizado resulta muy pequeña, a cambio de una protección mucho mayor contra la corrosión y una mayor vida útil.

Conformado, soldadura, reparación, manipulación, transporte y almacenamiento

La guía y los requisitos respecto al doblado, soldadura, reparación y otros aspectos se incluyen en la norma EN 10348-2: 2019.

Debido a su mayor durabilidad, no se necesita un especial cuidado en el transporte o manipulación de las armaduras galvanizadas, sin embargo se recomienda:

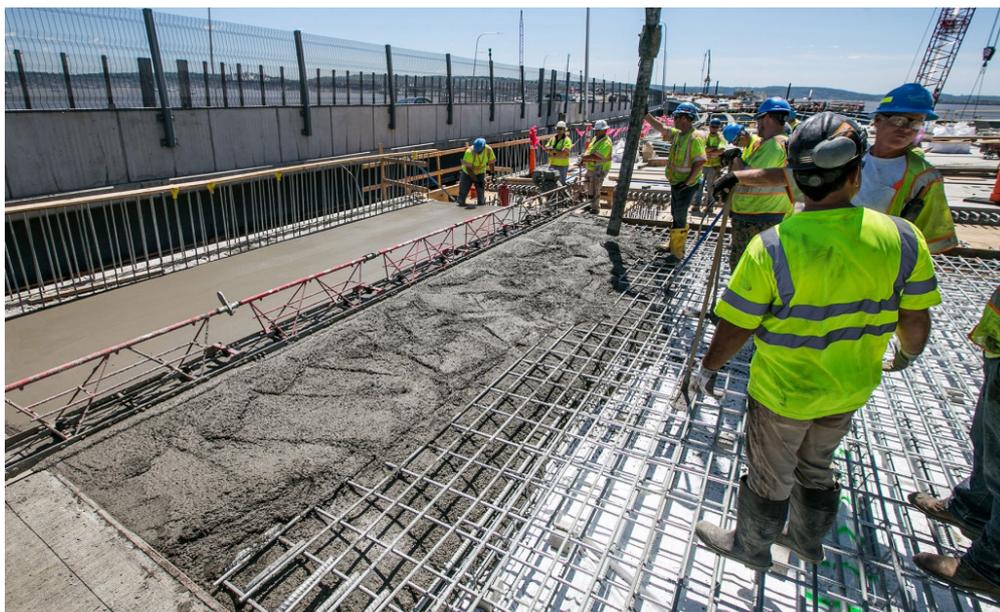
- El uso de cadenas, cuerdas de acero o cables para su elevación;
- Los paquetes deben elevarse utilizando varios puntos de carga;
- Se recomienda el uso de una barra separadora para evitar la abrasión innecesaria entre las barras en paquetes más largos;
- No es necesario un almacenamiento especial, aunque la armadura y la malla deben apilarse de modo que se permita el drenaje y el flujo de aire con objeto de evitar manchas de humedad prematuras;
- Como el recubrimiento de zinc no es sensible a la luz ultravioleta, se puede almacenar en cualquier lugar.



Instalación y cobertura

Debido a la excelente resistencia a la abrasión de la armadura galvanizada no se necesitan requisitos específicos para su instalación. Debido también a su mayor fuerza de adherencia no es necesario instalar acero adicional (algunos recubrimientos protectores necesitan longitudes de solapamiento del acero un 20% - 50% mayores en comparación con la armadura sin recubrimiento).

Al igual que la armadura sin recubrir, con la armadura galvanizada no se requieren condiciones climáticas específicas para su instalación y al estar recubierta, el trabajo es mucho más limpio. La unión metalúrgica del zinc con el acero además reduce el posible daño durante su instalación.

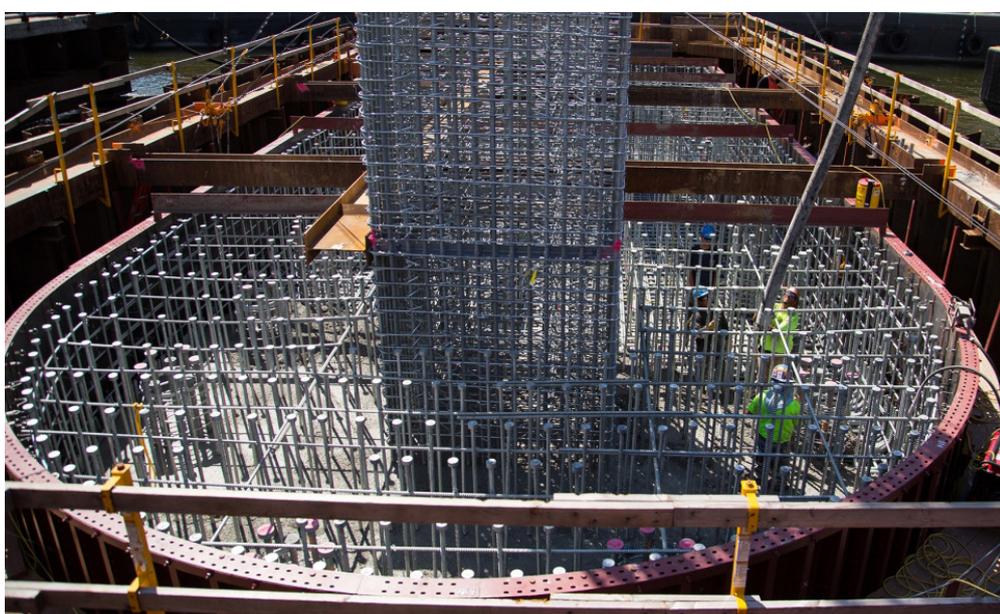


Utilización conjunta de armaduras galvanizadas y sin galvanizar

Es poco probable que ocurran reacciones corrosivas entre las armaduras galvanizadas y sin galvanizar en el hormigón, en tanto en cuanto ambos metales permanezcan pasivados. Para estar seguros, el recubrimiento de hormigón sobre la armadura sin galvanizar y sus uniones, no debe ser menor que el recubrimiento aplicado en las zonas donde hay armadura sin galvanizar sola y en las mismas condiciones.

Cuando se utilicen armaduras galvanizadas, se recomienda que todo el acero que esté en contacto con la armadura se galvanice, incluidos los cables de amarre, las intersecciones y las silletas, o que se utilicen bridas y silletas no metálicas o revestidas de plástico. Si la armadura galvanizada en caliente se coloca en contacto con acero sin recubrir en áreas propensas a la corrosión, el acero galvanizado actuará como ánodo de sacrificio del acero sin galvanizar, lo que reducirá su vida útil en el entorno del área de contacto.

En caso de que sea inevitable el contacto con la armadura sin galvanizar, se puede usar polietileno y cinta dieléctrica para proporcionar aislamiento eléctrico entre los dos metales. Se debe usar alambre galvanizado o clips de plástico al ensamblar o instalar la armadura galvanizada y los soportes de las barras también deben ser de acero galvanizado, plástico o algún otro material inerte como mampostería. Si se utilizan acopladores mecánicos, también deben estar galvanizados.



Los 43 pares de pilares de hormigón del Puente Mario M. Cuomo están reforzados con jaulas de armadura galvanizada.

Razones para utilizar armaduras galvanizadas en caliente

1 El acero de la armadura galvanizada se pasiva en el hormigón húmedo mediante la formación de una película adherente de hidroxincato de calcio. Al formar esta película, **incrementa la fuerza de unión entre la armadura y el hormigón.**

2 La armadura galvanizada es estable en un amplio rango de pH y **no se ve afectada en absoluto por la carbonatación del hormigón.**

6 En aplicaciones expuestas a la carbonatación, **el acero galvanizado permite utilizar cubiertas de hormigón más finas** que con la armadura sin recubrimiento, logrando la misma durabilidad. El hormigón con armadura galvanizada no tiene requisitos especiales de diseño, ni requiere más acero.

7 Si la armadura galvanizada se despasiva, el zinc se corroerá a un ritmo más lento que el hierro, y el recubrimiento de zinc proporcionará una barrera contra la corrosión. A diferencia de los del hierro, los productos de corrosión del zinc migrarán del revestimiento galvanizado, reduciendo la porosidad y con ello la velocidad de entrada del cloruro. Los productos de corrosión del zinc tienen un volumen menor que los del hierro, lo cual disminuye la presión expansiva generada por el proceso de corrosión, **reduciendo así el tamaño de las grietas que puedan formarse.**

8 La armadura galvanizada es una forma eficaz de garantizar la durabilidad de una estructura de hormigón a **un coste mucho menor que con otras soluciones, como el acero inoxidable.**

11 El proceso de galvanizado **no tiene un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas del acero.** Todos los grados de acero existentes pueden galvanizarse.

3 Siendo conservadores, se puede afirmar que una armadura galvanizada tiene un umbral de ataque por cloruros 2 a 2,5 veces más alto que el acero sin recubrimiento; esto duplica el tiempo necesario para la despasivación y el inicio de la corrosión. La armadura galvanizada **aumenta la vida útil de la estructura de 4 a 5 veces**, en comparación con el acero sin revestimiento.

4 El tiempo hasta el inicio de la corrosión de una armadura galvanizada en el hormigón se puede modelizar utilizando modelos convencionales de difusión de cloruros basados en la Segunda Ley de Fick.

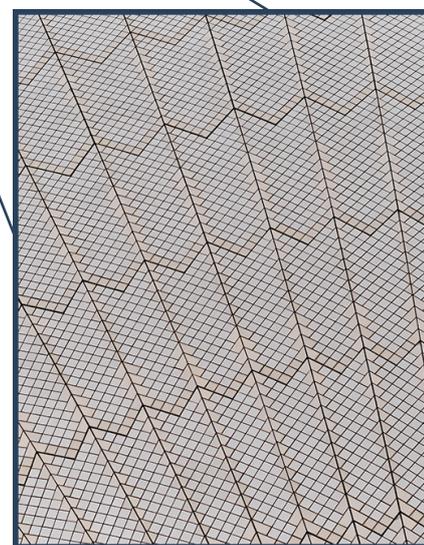
5 Debido a su comportamiento pasivo, la armadura galvanizada es perfecta para entornos agresivos e ideal para fachadas externas, juntas de paneles prefabricados y elementos superficiales. Es de hecho recomendable, **en cualquier aplicación donde pueda existir riesgo de carbonatación o entrada de cloruros en el hormigón.**



9 La armadura galvanizada, a diferencia de los sistemas de protección catódica, **no requiere pruebas periódicas ni mantenimiento.**

10 A diferencia de los recubrimientos epóxicos, la armadura galvanizada **proporciona protección de barrera, mejor adherencia, una capa pasivante superficial y actúa como ánodo de sacrificio en caso de que la armadura quede expuesta. Tiene una excelente resistencia a la abrasión, no se ve afectada por la luz ultravioleta y no tiene requisitos especiales de almacenamiento, transporte, manipulación e instalación.**

12 La galvanización es una alternativa sostenible. El galvanizado dispone de Declaración Ambiental de Producto (DAP), además el zinc del recubrimiento se recicla junto con el acero al final de su vida útil. El pequeño impacto medioambiental del proceso de galvanizado se compensa con los enormes ahorros de CO₂ asociados a una mayor durabilidad de la estructura de hormigón armado.



Los ensamblajes de las losetas en espiga de la Ópera de Sydney se construyeron con armadura galvanizada en caliente.

Referencias

- American Galvanizers Association, Hot-Dip Galvanized Reinforcing Steel: A Specifiers Guide, AGA, Centennial, CO, USA, 2012.
- Concrete Institute of Australia, The Use of Galvanized Reinforcement in Concrete, Current Practice Note 17, 2008, Concrete Institute of Australia, Sydney.
- Concrete Institute of Australia (2014), "Concrete Durability Series: Z7/O5 Durability Modelling", Sydney.
- Concrete Institute of Australia (2018), "Concrete Durability Series: Z7/O2 Durability Exposure Classifications", Sydney.
- ILZRO, Galvanized Reinforcement for Concrete – II, 1981, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA
- Mariusz Jaśniok, Maria Sozańska, Jacek Kołodziej and Bartosz Chmiela, "A Two-Year Evaluation of Corrosion-Induced Damage to Hot Galvanized Reinforcing Steel B500SP in Chloride Contaminated Concrete", 2020
- NACE International, "International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology (IMPACT)", CORROSION CONFERENCE 2016, Vancouver, Canada
- Tuutti, K. (1982) "Corrosion of steel in concrete". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm
- Yeomans S R (Editor), Galvanized Reinforcing Steel in Concrete, Elsevier UK, December 2004, ISBN 008044511
- Yeomans, S R (2004), "Chapter 1 – Galvanized Steel in Concrete: An Overview", in Yeomans, S R (ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier Science, pp. 1–7.
- Zhao Y, Jin W, Damage Analysis and Cracking Model of Reinforced Concrete Structures with Reinforcing steel Corrosion in Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking, 2016

Agradecimientos

Referencias de imágenes

Portada, páginas 1, 2, 9, 10:	New York Thruway Authority
Páginas 3, 4, 5, 7:	Galvanizers Association of Australia
Páginas 3, 4:	Shutterstock.com
Página 11:	stock.adobe.com

Nuestro agradecimiento a la Asociación de Galvanizadores de Australia por su amable colaboración en la preparación de este documento.

Para más información sobre el uso de Armaduras Galvanizadas en Hormigón: Asociación Técnica Española de Galvanizado:

Asociación Técnica Española de Galvanización, ATEG

P de la Castellana, 143 - 1A
28046 Madrid
España

galvanizacion@ateg.es
www.ateg.es



European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft
B73 6AZ
United Kingdom

www.egga.com
mail@egga.com

Boulevard du Souverain 68
1170 Brussels
Belgium

