

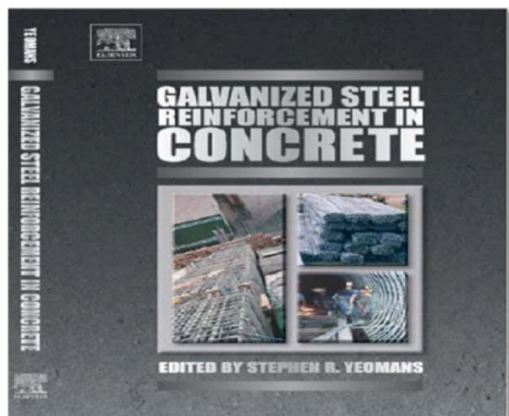
# **Refuerzo de Acero Galvanizado en el Concreto: Una visión general**

**Profesor Stephen R. Yeomans  
Universidad de New South Wales  
Canberra, Australia**

## **Nota Editorial**

Este trabajo presenta una visión general de las características y el empleo del refuerzo galvanizado en la construcción de concreto. Esto se proporciona para complementar las presentaciones del Taller – *Estructuras de Concreto más durables empleando Refuerzo de Acero Galvanizado por Inmersión Caliente* respaldado por la Asociación Internacional de Zinc, El Fondo Común de las Naciones Unidas para Productos Básicos y el Grupo de Estudio Internacional del Plomo y el Zinc.

La información presentada en este trabajo fue extraída del libro publicado recientemente *Refuerzo de Acero Galvanizado en el Concreto*, SR Yeomans (Editor), Elsevier, 2004. Al preparar esta visión general, se decidió no proporcionar una referencia extensa a parte de los capítulos individuales del libro. Más bien, esta información es un resumen de los aspectos claves de la ciencia y de la tecnología, e ingeniería, entorno al empleo del refuerzo galvanizado en la construcción del concreto reforzado. Los lectores deben referirse al libro para obtener más detalles de los temas considerados en este trabajo y también para obtener mayor referencia.



**Diciembre: 2004, 320pp  
ISBN: 0-08-044511-X  
Patrocinado por ILZRO  
Proyecto (ZE 429)**

## 1. Introducción

El comportamiento a largo plazo del concreto reforzado suele ser evaluado con arreglo a dos criterios principales, utilidad y durabilidad. La utilidad se relaciona con la integridad estructural, la capacidad del elemento para sostener las cargas a lo largo de su vida y realizar sus funciones previstas. La durabilidad se refiere a la capacidad del concreto para resistir los cambios en su microestructura y propiedades, en particular cuando dichas modificaciones pueden afectar negativamente la utilidad del elemento. Quizás la consecuencia más evidente de la falta de durabilidad en el concreto reforzado es la corrosión del acero de refuerzo.

El acero embebido en el concreto está protegido contra la corrosión debido a la pasivación de la superficie del metal. Esta película protectora se forma en el medio altamente alcalino del cemento hidratado ( $> \text{pH } 12.5$ ), y el acero no se corroerá siempre que la película pasiva permanezca intacta. Para la protección contra la corrosión a largo plazo, la masa de concreto debe limitar el transporte de especies tales como el agua, los iones de cloruro, oxígeno, dióxido de carbono y otros gases a través del concreto a la profundidad del refuerzo. La presencia de niveles de umbral de estas especies, generalmente son transportados en el agua a la mezcla de concreto, incluso cambia la naturaleza del concreto o altera la condición del acero embebido. En cualquier caso, la corrosión del acero puede iniciarse.

Los iones de cloruro presentes en concentraciones por encima del umbral despasiva al acero incluso si el pH del concreto adyacente permanece elevado. Por otro lado, el dióxido de carbono y otros gases, en soluciones acuosas reaccionan con el agua intersticial rica en álcalis y reduce el pH del concreto por debajo del nivel mínimo de pasivación. Este proceso, conocido como **carbonatación**, se refiere específicamente a la neutralización de la solución en el poro rica en cal mediante los ligeros gases ácidos disueltos en agua. La disponibilidad del oxígeno para la reducción catódica es también un componente esencial del proceso de corrosión.

La corrosión del refuerzo podría originar daños significativos en la masa de concreto, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Los productos de corrosión que se forman son expansivos (2 - 10 veces mayor) y se depositan en la interfaz entre la barra y el concreto. Esto provoca hinchazón a una presión de magnitud suficiente (3-4 MPa) para agrietar al concreto en tensión, las grietas por lo general van desde la barra hasta la superficie exterior más próxima. Una vez que se produjo la grieta, la mancha de óxido de la superficie continua con el desprendimiento de la masa o desmoronamiento de las piezas de concreto de la superficie. En esta etapa, la estructura estaría seriamente dañada, y la reparación será necesaria su para ampliar su vida útil.

**Figura 1: El progreso de la corrosión - daño producido en el concreto**



A nivel mundial, los costos relacionados con tales trabajos de reparación son enormes y se espera que se incrementen en el futuro a un ritmo alarmante. Las estimaciones de estos costos varían ampliamente. Por ejemplo, ya en 1997 en Estados Unidos, el costo de reparación importante y la sustitución de los tableros de puentes dañados fue de aproximadamente US \$ 23b. A fines de 1980, el Ministerio de Transportes del Reino Unido estimó los costos de reparación de algunas autopistas en Inglaterra y Gales por £616m. Durante el mismo periodo en Estados Unidos, los costos anuales asociados con las reparaciones de tableros de puentes debido a las sales deshielo por sí sola era alrededor de \$US50-200m, más un adicional de \$US100m para subestructuras y \$US50-100m para los garajes de parqueo en varios niveles.

## **2. Prevención de la Corrosión en el Concreto Reforzado (referirse al Capítulo 1)**

El modo más efectivo y rentable para minimizar el riesgo por corrosión en el concreto reforzado es asegurar que la cobertura para el refuerzo sea de un espesor adecuado y que el concreto sea denso e impermeable. La función principal de la cobertura de concreto es proteger al refuerzo de acero y solo se puede lograr si la estructura y la mezcla se han preparado adecuadamente y sean seleccionados los materiales adecuados para adaptarse a las condiciones de exposición, el refuerzo ha sido instalado correctamente en el encofrado para lograr el recubrimiento requerido y la mezcla ha sido bien colocada, compactada y curada.

A pesar de este conocimiento, es lamentable que el deterioro del concreto debido a la corrosión no sea infrecuente. Esto puede ser el resultado de un mal diseño o la utilización del concreto de calidad inadecuada en condiciones agresivas. De igual modo, puede deberse a simples deficiencias en el concreto tal como la cobertura insuficiente de los refuerzos, porosidad y agrietamiento como consecuencia de malas prácticas locales (mano de obra) en la colocación del concreto, incluso en condiciones de exposición leves a moderadas.

Para mitigar estos efectos, una serie de enfoques están disponibles incluyendo:

- el empleo de recubrimientos tipo membrana aplicado a la superficie del concreto;
- la impregnación del concreto con materiales destinados reducir su permeabilidad,
- la adición de inhibidores de corrosión para el concreto;
- el empleo de refuerzos resistentes a la corrosión:
- protección catódica del refuerzo; y / o
- la aplicación de recubrimientos para el mismo refuerzo.

Durante un periodo considerable de tiempo, el recubrimiento del refuerzo ha sido ampliamente aceptado como un medio conveniente y económico para la protección contra la corrosión a parte del proporcionado por la cobertura del concreto que se emplea en varios tipos de construcción de concreto. El material del recubrimiento puede ser metálico o no metálico, o tal vez una combinación de ambos (es decir, recubrimientos “duplex”) que proporcionan una protección tipo barrera para el acero al asilarlo del medio ambiente local. Algunos ejemplos incluyen recubrimientos orgánicos tales como pinturas y polvos adheridos por fusión, y recubrimientos de metales nobles sobre el acero tales como estaño, cromo, cobre y acero inoxidable. Por otro lado, los recubrimientos de metales activos sobre el acero tales como el zinc, cadmio y aluminio no solo proporcionan protección de barrera simple sino también protección catódica adicional en la que el recubrimiento actúa como un ánodo de sacrificio en el caso de que el acero subyacente quede expuesto.

De todos los sistemas de recubrimiento disponibles, los dos recubrimientos más comunes son el galvanizado por inmersión en caliente (HDG, por sus siglas en inglés) y los recubrimientos epóxicos adheridos por fusión (FBECR, por sus siglas en inglés).

Como principio general, si el refuerzo recubierto se elige como un sistema de protección contra la corrosión, este no debe tener en cuenta el empleo del concreto de mejor calidad y apropiado para la aplicación deseada. Si esto se consigue, y si se tiene cuidado en la especificación de los materiales de concreto y en la mezcla de diseño, así como, en la atención a la buena mano de obra y la supervisión de la práctica del uso concreto, el recubrimiento del refuerzo ofrece una serie de ventajas sobre el acero negro que incluyen:

- un mayor tiempo para el inicio de la corrosión del acero y un menor riesgo de agrietamiento, manchas de óxido y desmoronamiento del concreto;
- un incremento en la vida útil de la estructura del concreto o componente;
- una reducción en la frecuencia y prolongación de las reparaciones para el concreto;
- mayor tolerancia tanto para la variabilidad natural del concreto y la presencia de calidad inferior o concreto colocado deficientemente; y
- protección contra la corrosión del acero antes que sea embebido en el concreto.

Para el refuerzo recubierto de metal, la barra galvanizada por inmersión en caliente (es decir zincada) es lo más común. Su primer empleo regular fue en la década de 1930 en los EE. UU. Desde entonces, y especialmente durante los últimos 25-30 años, se emplea en una amplia variedad de tipos de construcción de concreto y condiciones de exposición en varios países que ha sido ampliamente documentado.

En apoyo a esto existe también un registro de publicaciones de varios laboratorios basadas en investigaciones y estudios en campo de las características y el comportamiento de productos de acero recubiertos con zinc en la construcción de concreto, por algo más de 30 años. La aceptación del empleo del refuerzo galvanizado se refleja en el número de normas nacionales e internacionales para el uso del refuerzo de acero recubierto con zinc (es decir galvanizado) publicado en los últimos años, y la existencia de muchos Códigos y Especificaciones en relación al refuerzo galvanizado publicado por los organismos federales y estatales, especialmente en Norte América.

### 3. Galvanización del Acero de Refuerzo (referirse al Capítulo 4)

El zinc puede ser aplicado a la superficie del acero mediante una variedad de procedimientos, pero para la estructura de acero (por lo general  $>5$  mm de espesor) se prefiere la inmersión en caliente y es el método más empleado. Esto implica sumergir el acero limpio en un baño de zinc fundido alrededor de  $470^{\circ}\text{C}$  durante el cual se produce una reacción metalúrgica entre el acero y el zinc. En la Figura 2 se muestra el esquema de una planta típica de galvanización por inmersión en caliente.

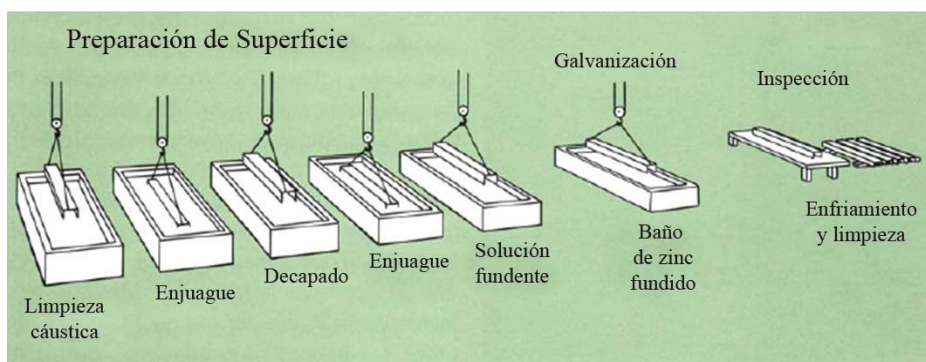


Figura 2. Esquema del proceso de galvanización por inmersión en caliente.

### 3.1 Morfología del Recubrimiento

La reacción entre el acero y el zinc fundido produce un recubrimiento sobre el acero formado por una serie de capas de aleación hierro-zinc (**gamma**, **delta** y **zeta**) que crecen desde la interfaz del acero / zinc con una capa de zinc puro (**eta**) en la superficie exterior. Lo que distingue a la galvanización de otros tipos de recubrimientos es que el recubrimiento es adherido metalúrgicamente al acero; esto se convierte en parte integral del acero, en claro contraste al caso de pinturas y recubrimientos epóxicos que se adhieren a la superficie del acero por unión física. Las capas de aleación en el recubrimiento son más resistentes que el acero base que resulta ser un recubrimiento que no sólo se adhiere firmemente al acero, sino que es duro y fuerte y puede resistir la abrasión y el manejo bastante pesado. Asimismo, permite que el artículo galvanizado pueda ser manipulado, transportado y fabricado del mismo modo que el acero normal.

En la Figura 3 se presenta una estructura típica del recubrimiento galvanizado (denominado también brillante).

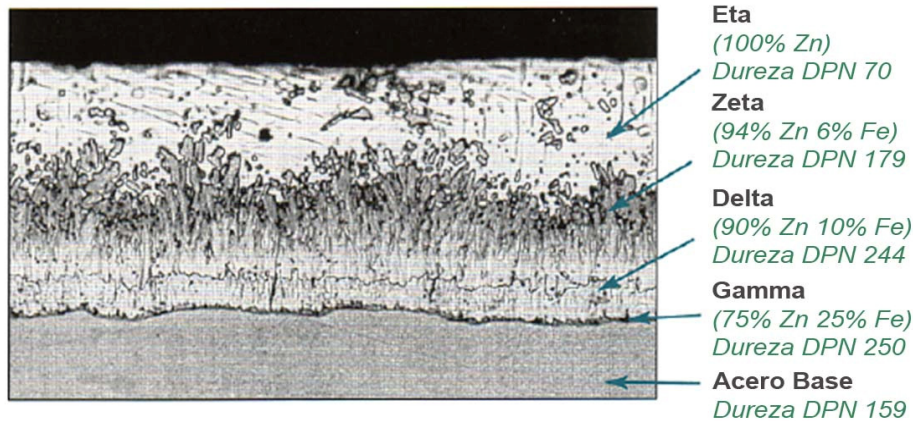


Figura 3. Fotomicrografía del recubrimiento galvanizado por inmersión caliente que muestra en detalle las capas de la aleación y su dureza.

Una característica única de la galvanización, dado que es un proceso por inmersión total, es que todas las áreas del producto son recubiertas incluyendo las áreas que están ocultas o de difícil acceso como los bordes o las superficies internas. La galvanización también produce naturalmente recubrimientos que son al menos gruesos en las esquinas y bordes, y algunas veces más grueso, en otras partes del producto como se muestra en la Figura 4.

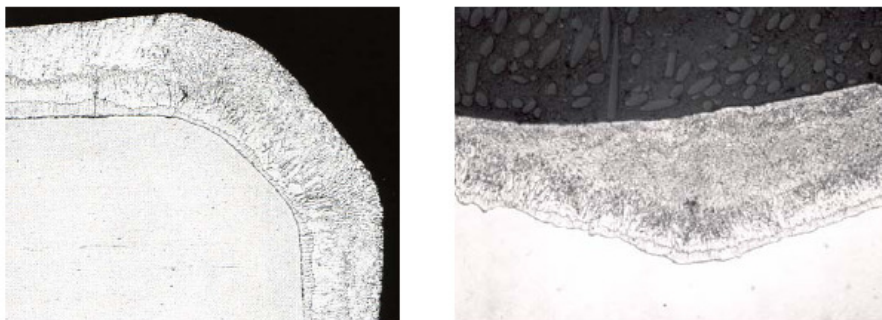


Figura 4. Protección en las esquinas y espesor de recubrimiento adicional en los recovecos en recubrimientos galvanizados por inmersión caliente.



Debido a la naturaleza vectorial del crecimiento de las aleaciones, el recubrimiento no es delgado en los bordes y esquinas como en el caso de los recubrimientos aplicados por pulverizado o pintura. Dado que el daño del recubrimiento es más probable que suceda en estas regiones durante la manipulación, transporte y fabricación, el espesor extra proporciona protección adicional en zonas donde más se necesita.

Los recubrimientos galvanizados no contienen necesariamente todas las capas de las aleaciones como se muestra anteriormente.

Dependiendo de la composición química del acero y de las condiciones del proceso, el recubrimiento puede contener sólo una o dos de las capas. Por ejemplo, la microestructura del recubrimiento sobre el acero que contiene silicio que se muestra en la Figura 5 se compone casi exclusivamente de cristales zetas ampliados, debido a la naturaleza reactiva del acero. Asimismo, los cristales zeta se han extendido hacia la superficie del recubrimiento y han consumido la capa exterior de zinc puro. Este recubrimiento tendrá una apariencia de superficie gris. El efecto del contenido de silicio en el acero, que influye en el espesor del recubrimiento galvanizado, es conocido como Efecto Sandelin y se muestra en la Figura 6.

Del mismo modo, cuando los aceros galvanizados son calentados (recocidos) por encima de unos 430-450 °C, el crecimiento de la fase zeta es acelerada lo que puede resultar en la desaparición total de la capa  $\eta$  en la superficie. Este efecto se emplea en la fabricación de productos galvanizados y recocidos (*galvannealed*) donde se mejora el pintado, la soldabilidad y el conformado de planchas de acero y los productos de bandas se obtienen al convertir totalmente el recubrimiento en aleación de zinc - hierro. Aunque los recubrimientos galvanizados pueden tener una variedad de microestructuras, no se producen cambios fundamentales en la resistencia a la corrosión del recubrimiento. Como se mencionó anteriormente, la medida de la protección contra la corrosión es una función del espesor del recubrimiento, y no de la estructura del recubrimiento. Como tal, la duración del brillo, en los recubrimientos brillantes, es similar a la de aquellos con apariencia gris mate.

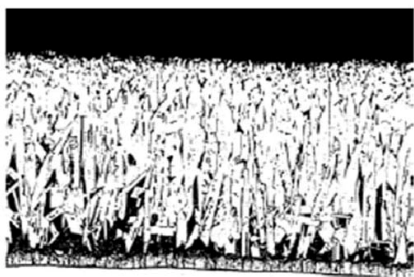


Figura 5. Revestimiento galvanizado sobre acero (reactivo) que contiene silicio

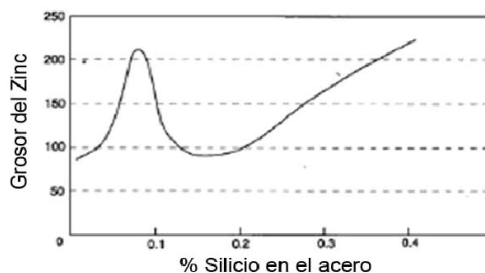


Figura 6. Efecto del contenido de silicio del acero sobre el espesor del revestimiento de zinc

### 3.2 Vida Útil o Durabilidad

La durabilidad anticipada de los recubrimientos de zinc de espesores que fluctúan en una variedad de condiciones de exposición ambiental se muestra en la Figura 7. Cabe señalar que estos datos, relacionados con las condiciones donde la superficie está expuesta completamente, muestra que el índice de corrosión del zinc tiende a ser muy lineal con el transcurso del tiempo. Esto se debe al hecho de que la corrosión del recubrimiento en la atmósfera suele ser usualmente generalizada y el recubrimiento puede ser “refrescado” mediante la acción del agua para eliminar los productos de corrosión. No se espera que el acero galvanizado en el concreto se comportara del mismo modo debido a que la corrosión en algún ambiente “fijo” de concreto es más localizada y los productos de corrosión están limitados en su movimiento hacia fuera de la superficie, por lo que tienden a reprimir el proceso.

La durabilidad descrita en la Figura 7 se relaciona también al tiempo hasta el 5% de corrosión sobre la superficie total, y no al tiempo para la eliminación total de toda la masa de recubrimiento.

Tenga en cuenta que 1mil (1 milésimo de pulgada) = 25.4 micrones del espesor del recubrimiento es equivalente a una masa de recubrimiento de 0.58 oz/ft<sup>2</sup> o aproximadamente 182 g/m<sup>2</sup>.

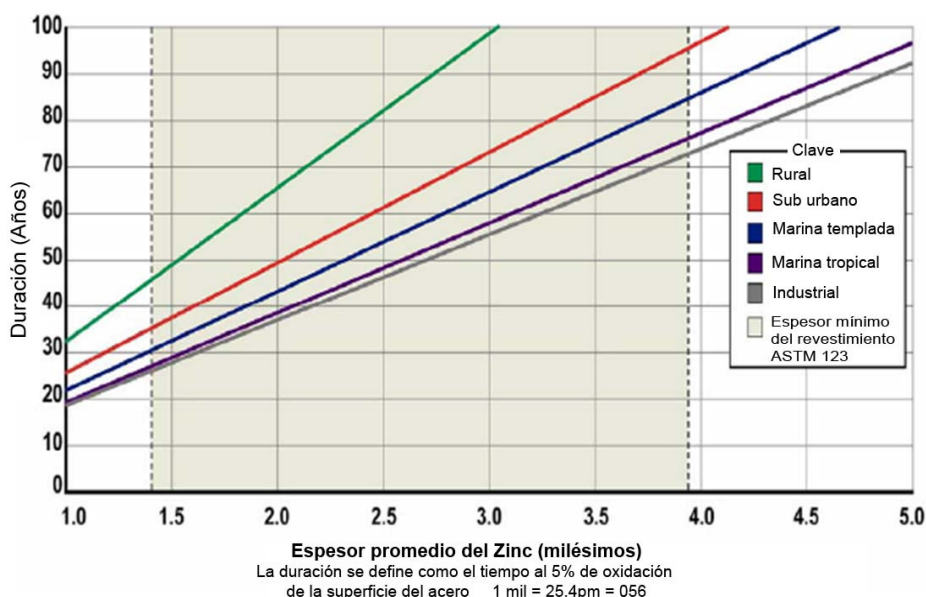


Figura 7. Cuadro de durabilidad para recubrimientos galvanizados por inmersión caliente.

### 3.3 Fabricación de Productos Galvanizados

La fabricación de barras de refuerzo y otros componentes (estribos, amarres, etc.) se deben realizar antes de la galvanización. La galvanización después de la fabricación proporciona protección del recubrimiento en todos los bordes y uniones y se aprovecha al máximo la protección contra la corrosión proporcionado por el recubrimiento de zinc. Asimismo, evita los daños innecesarios al recubrimiento y se minimiza la exposición de los bordes sin protección. Aunque el daño al recubrimiento puede ser reparado mediante la aplicación de pinturas ricas en zinc o soldaduras de zinc, la reparación nunca es tan buena como el recubrimiento original, ni durará tanto. Existen, por supuesto, varias situaciones en que los productos de acero de refuerzo galvanizados deben ser fabricados en campo. En estos casos, es de esperar que se produzcan algunos daños al recubrimiento, pero con el debido cuidado la severidad de este daño puede ser reducido.

En el tratamiento de barras de refuerzo, generalmente es más conveniente y económico galvanizar longitudes rectas de la barra de refuerzo con toda la fabricación realizada luego de la galvanización. Durante la fabricación de las barras galvanizadas, la tendencia al agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento galvanizado en el área de la curvatura se incrementa con el diámetro de barra, la severidad y el índice de

curvatura. El daño al recubrimiento puede minimizarse empleando diámetros de curvatura amplios y mandriles y matrices de tamaño apropiado. Los métodos empleados para la manipulación, fabricación y transporte del refuerzo galvanizado son similares a aquellos empleados para el acero de refuerzo tradicional y no se consideran requisitos o técnicas especiales.

Como una alternativa para fabricar barras rectas después de la galvanización, las barras prefabricadas dobladas para formar configuraciones especiales (por ejemplo, refuerzo de columna en espiral o malla formada) pueden galvanizarse. Esta ofrece la ventaja que producirá muy poco o ningún daño al recubrimiento como puede ser el caso con las prácticas de fabricación normal.

Ejemplos de una variedad de productos de acero empleados comúnmente en la construcción de concreto armado o reforzado se muestra en la Figura 8.

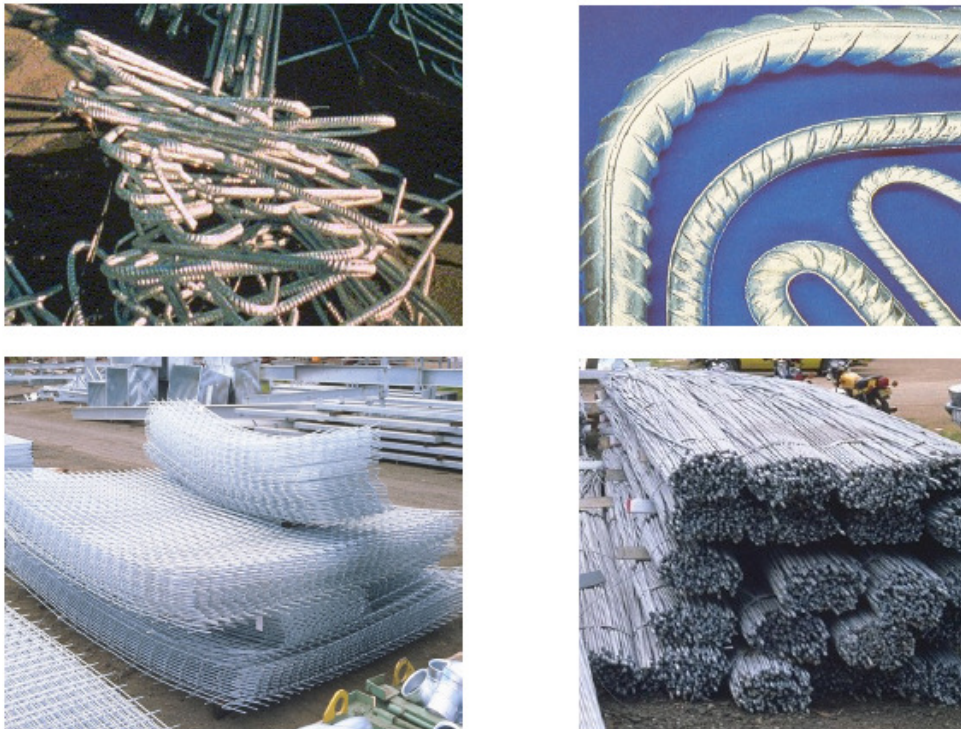


Figura 8. Una variedad de productos de acero galvanizado para el uso en concreto.

### 3.3.1 Resistencia a la flexión del acero galvanizado

Los productos que han sido galvanizados (por lotes) muestran diferentes características de resistencia a la flexión que los productos de planchas galvanizadas principalmente debido a las diferencias en el espesor del recubrimiento y en la estructura del recubrimiento de cada producto. Los productos de planchas galvanizadas tienen un recubrimiento más delgado que los productos galvanizados por lotes, y el recubrimiento es de zinc puro o totalmente aleado como en los recubrimientos galvanizados y recocidos (*galvannealed*). Ambos tipos de recubrimiento tienen excelentes propiedades de resistencia a la flexión; el recubrimiento de zinc puro se estira durante las operaciones de conformado, mientras que los recubrimientos galvanizados y recocidos producen pequeñas grietas para aliviar los esfuerzos de flexión.



Como se mencionó anteriormente, la estructura del recubrimiento de los productos galvanizados por lotes tales como los refuerzos, es típicamente una combinación de capas de aleación y zinc puro. Durante la flexión la capa externa de zinc puro se extiende, mientras que las capas de aleación alivian las tensiones producidas por el agrietamiento. El descascarillamiento del recubrimiento puede producirse si la flexión es demasiado severa, como una regla general, los productos que poseen un espesor de recubrimiento excesivo ( $> 250$  micrones) no deben ser doblados.

### ***Flexión antes de la galvanización***

Las buenas prácticas de fabricación establecen que al realizar la flexión de la barra de acero antes de la galvanización, se debe emplear un diámetro mínimo de flexión de  $3d$ , donde  $d$  es el diámetro de la barra. La flexión para esta dimensión minimiza los efectos perjudiciales de trabajo en frío de la microestructura del acero que podría resultar en fragilidad por envejecimiento durante la galvanización. La barra de acero laminada en caliente con un límite elástico de aproximadamente 250 Mpa, o la barra de refuerzo de resistencia más elevada (400-500 MPa) reforzada por enfriamiento mediante inmersión y proceso de temple o micro – aleación y una pequeña cantidad de trabajo en frío, que se dobla antes de la galvanización, permanece dúctil luego de la flexión, de ese modo permite el enderezamiento y la re-flexión.

La flexión antes de la galvanización tendrá como resultado un producto superior debido a que se evita totalmente el daño al recubrimiento por corte y operaciones de conformado. Asimismo, esto se aplica a la galvanización de los elementos de refuerzos soldados y prefabricados tales como refuerzo de columna y refuerzo de panel prefabricado. Por razones prácticas, la flexión se realiza después de la galvanización. El transporte y procesamiento de las barras rectas es más fácil y económico, y es preferido por la mayoría de los galvanizadores.

No se requiere la manipulación especial de las piezas dobladas (estribos, amarres, ganchos, etc.).

### ***Flexión después de la galvanización***

Por razones prácticas, la flexión se realiza normalmente después la galvanización. El transporte y el procesamiento de paquetes de las barras rectas son más fáciles y más económicos, y es preferido por la mayoría de los galvanizadores.

La manipulación especial de las piezas dobladas (estribos, amarres, ganchos, etc.) que puede incluir separación, marcado, y modificación, no se requiere. Las piezas pre-dobladas no pueden colocarse mal durante la manipulación y almacenamiento.

Aunque el plegado de la mayoría de barras galvanizadas varía desde aquellas barras sin recubrir, para minimizar el agrietamiento del recubrimiento galvanizado se recomiendan los siguientes diámetros de doblado mínimos (para doblados de  $90^\circ$ ).

- hasta 16mm de diámetro de barra - doblado de  $5d$ , y
- mayor de 16mm de diámetro de barra - doblado de  $8d$ .

Con formato: Justificado

Cualquier operación de conformado, incluyendo la flexión, puede originar algunas grietas y el desprendimiento del recubrimiento galvanizado. Esto es particularmente cierto si los diámetros de doblez son menores a la recomendación mínima, y si se requiere la re-flexión o el enderezamiento de las barras dobladas. Cualquier daño al recubrimiento debe ser reparado según las recomendaciones de la mayoría de normas de galvanización. El empleo del calentamiento para la flexión y re-flexión de la barra de refuerzo galvanizado debe evitarse debido a la posibilidad de que el recubrimiento de zinc origine la fragilización por metal líquido.

Con formato: Justificado

### 3.3.2 Soldadura del acero galvanizado

El refuerzo galvanizado (como sucede con otros productos galvanizados) puede ser soldados satisfactoriamente mediante todas las técnicas de soldadura comunes. Aunque la soldadura puede ser realizada por soldadura a través del recubrimiento galvanizado, el método preferido para eliminar el recubrimiento de zinc en la región de la soldadura, por lo general mediante esmerilado o granallado, y soldado directamente el metal base descubierto. En general, cualquier cosa que puede ser soldada antes de la galvanización puede ser soldada después de la galvanización, aunque se necesita incorporar algunos cambios en la técnica de soldadura para asegurar la penetración total de la soldadura. Estos cambios están destinados principalmente a permitir que el recubrimiento galvanizado se queme por delante del baño de soldadura en fusión. En las zonas donde el recubrimiento se ha eliminado para facilitar la soldadura, y en donde el calor de la soldadura ha dañado el resto del recubrimiento, también se deben realizar reparaciones.

### 3.3.3 Reparación de los recubrimientos galvanizados

Los recubrimientos galvanizados que han sido dañados durante su fabricación o soldadura pueden ser reparados de diferentes maneras como se describe a continuación (referirse también al ASTM A780).

#### *Soldaduras a base de Zinc*

La soldadura común (zinc, estaño, plomo, zinc-cadmio, aleaciones de zinc-estaño -cobre) se aplica en barra o en forma de polvo a una superficie precalentada y preparada. La preparación de la superficie puede ser por cepillado, esmerilado ligero o limpieza con abrasivos y la superficie debe estar libre de grasa y materia sólida. Una pasta o fundente líquido se aplica a medida que la superficie es calentada (por lo general, por llama de oxi-gas) aproximadamente a 300°C. Se deben tomar precauciones durante el calentamiento a fin de prevenir que se oxide el metal expuesto o dañar el recubrimiento galvanizado circundante. La soldadura fundida se esparce con un cuchillo o espátula; luego se limpia. Las soldaduras no son apropiadas para el retoque de grandes áreas, y el recubrimiento resultante es de por sí muy delgado.

#### *Pintura rica en zinc*

El uso de pintura rica en zinc (tanto orgánica o inorgánica) es el modo más rápido y conveniente de reparación (véase Figura 9). Las pinturas de polvo de zinc contienen entre 65 y 69% de zinc en peso o más del 92% de zinc metálico en la película seca. Las pinturas inorgánicas son útiles para reparación y retoque que puede extenderse hasta las áreas galvanizadas sin daños. Las pinturas se aplican con brocha o pistola sobre una superficie que ha sido preparada hasta un acabado cercano al blanco. Para lograr una buena adherencia del recubrimiento es importante una preparación minuciosa de la superficie. Normalmente para un rendimiento óptimo se especifica un espesor total de recubrimiento de 100 µm y se toman las medidas del espesor para asegurar que el recubrimiento requerido sea aplicado.

Figura 9. Muestra de la reparación de retoque de los cortes de la barra de refuerzo galvanizado utilizando pinturas inorgánicas ricas en zinc.



### ***Metalización con Zinc***

El pulverizado metálico con zinc (metalización) debe aplicarse a una superficie que ha sido limpiada hasta obtener un acabado a metal blanco. El zinc empleado, en forma de alambre de zinc o polvo de zinc, normalmente es del 99.5% de zinc puro, aunque se puede emplear también las aleaciones de zinc y aluminio. El recubrimiento por pulverizado debe aplicarse lo más pronto posible luego de la preparación de la superficie (dentro de cuatro horas) y antes que se produzca el deterioro visible de la superficie. La adherencia del pulverizado de zinc al metal base se produce mediante medios mecánicos y depende de la calidad de la preparación de la superficie y del grado de limpieza. El recubrimiento se aplica normalmente a un espesor equivalente al recubrimiento intacto o sin daños y se deben tomar las medidas para asegurar que el recubrimiento requerido ha sido aplicado.

### **3.4 Normas de Galvanización**

La regulación de la galvanización por inmersión en caliente de las barras de acero de refuerzo es tratada en diferentes modos alrededor del mundo. Algunos países consideran a las barras de acero de refuerzo del mismo modo como cualquier otro producto de acero y la galvanización por inmersión en caliente del refuerzo se encuentra bajo una norma de galvanización general. En otros países se han publicado sólo las normas dedicadas al acero de refuerzo. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las normas de algunos países.

Tabla 1. Normas para la galvanización por inmersión en caliente de barras de refuerzo.

	<b>Designación</b>	<b>Título</b>
<b><i>Normas para la Galvanización General</i></b>		
Australia / Nueva Zelanda	AS/NZS 4680	Galvanización por inmersión en caliente después de la fabricación.
Canadá	CAN/CSA G164	Galvanización por inmersión en caliente de artículos de forma irregular.
Sudáfrica	SABS/ISO 1461	Recubrimientos de galvanización por inmersión en caliente sobre artículos fabricados de hierro y acero.
Suecia	SS-EN ISO 1461	Recubrimientos de galvanización por inmersión en caliente sobre artículos fabricados de hierro y acero.
Reino Unido	BS EN ISO1461	Recubrimientos de galvanización por inmersión en caliente sobre artículos fabricados de hierro y acero.
Organización Internacional de Normas	ISO 1461	Recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente sobre artículos fabricados de hierro y acero.
<b><i>Normas para el Acero de Refuerzo</i></b>		
Estados Unidos	ASTM A767	Barras de acero (galvanizadas) para refuerzo de concreto.
Reino Unido	BS ISO 14657	Acero recubierto de zinc para el refuerzo de concreto.
Francia	NF A35-025	Barras galvanizadas por inmersión en caliente y alambón para concreto reforzado.
Italia	UNI 10622	Barras de acero (galvanizadas) y alambones para refuerzo de concreto.
India	IS 12594	Recubrimientos por inmersión en caliente sobre barras de acero estructural para las especificaciones de refuerzo de concreto.
Organización de Normas Internacionales.	ISO 14657	Acero recubierto con zinc para refuerzo de concreto.

En todas estas normas generales de galvanización se especifica un espesor mínimo (o masa) del recubrimiento dependiendo del tipo y espesor del material base. Para las secciones estructurales más gruesas con un espesor entre 5 y 6 mm, lo que incluiría refuerzos y otros productos de refuerzo, se especifica un espesor de recubrimiento promedio mínimo en el rango entre 600 y 610 g/m<sup>2</sup>, lo que equivale a un espesor de recubrimiento entre 85 y 87 µm. Requisitos similares se encuentran en la norma ISO 14657 para barra la superior a 6 mm de diámetro.

### 3.5 Técnicas de Manipulación en Campo

Como una guía general, el refuerzo galvanizado puede ser transportado y manipulado generalmente del mismo modo que el acero negro. Asimismo, esto no requiere ninguna de precaución especial para proteger al recubrimiento contra cualquier daño superficial durante el transporte y manipulación en capo. En la Tabla 2, se presenta un resumen de las técnicas de manipulación que pueden ser empleadas con el refuerzo galvanizado. Si bien no pretende ser totalmente inclusiva, se presenta como una guía las mejores prácticas para la industria (referido a la Asociación Americana de Galvanizadores). Otros temas de discusión sobre la manipulación en campo pueden surgir de vez en cuando y estos deben ser evaluados a la luz de estas recomendaciones.

Tabla 2. Resumen de las Técnicas de Manipulación

Operación	Recomendación
Recepción del material e inspección	<ul style="list-style-type: none"> <li>inspeccionar visualmente para detectar daños y</li> <li>verificar para asegurar la carga en el transporte.</li> </ul>
Descarga y manipulación en la zona de trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>no es necesario ninguna manipulación especial o cuidado</li> <li>levantar paquetes en varios lugares de recogida, o</li> <li>emplear barra de separación con bandas de nylon adicionales para prevenir la flexión y la abrasión entre barras en los paquetes más grandes.</li> </ul>
Almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>el material en bloque almacenarlo sobre una pendiente para el drenaje y flujo de aire.</li> </ul>
Colocación	<ul style="list-style-type: none"> <li>no necesita cuidado especial.</li> </ul>
Soportes de barra y alambres de atadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>los soportes de barras, espaciadores y soportes de refuerzo deben ser galvanizados,</li> <li>emplearse para las ataduras alambre galvanizado calibre 16.5 o más grueso</li> <li>otros materiales aceptables para estas piezas son plástico o no conductores para acero recubierto.</li> </ul>
Detalles de acoplamiento y empalme	<ul style="list-style-type: none"> <li>se recomienda un acoplador galvanizado o inoxidable,</li> <li>para las uniones soldadas todas las soldaduras deben ser retocadas según lo recomendado, y</li> <li>emplear máscaras de protección apropiadas y ventilación adecuada durante la soldadura.</li> </ul>
Corte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se debe evitar el corte, y</li> <li>la reparación de los cortes debe realizarse empleando los procedimientos de retoque. (referirse al ASTM A780).</li> </ul>
Inspección final y reparación	<ul style="list-style-type: none"> <li>el retoque de corte y extremos quemados deben realizarse siguiendo los procedimientos recomendados (referirse al ASTM A780).</li> </ul>
Verter el concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>no es necesario ninguna manipulación especial o cuidado</li> </ul>

### 4. Diseño del Concreto con Refuerzo Galvanizado (referido al Capítulo 2)

La experiencia por más de varias décadas del empleo exitoso ha demostrado que el diseño y la construcción del concreto con refuerzo galvanizado es, para todos los ámbitos y propósitos, lo mismo que lo empleado para el concreto con refuerzo de acero convencional. Como se mencionó anteriormente, no se necesita tomar preacusaciones



en la fabricación y manipulación de la barra galvanizada, a parte de las recomendaciones que necesitan los radios de curvatura apropiadamente doblados para ser usados y retocados en los extremos y áreas de dañadas del recubrimiento. Similarmente, no hay requerimientos especiales para el diseño de concreto con refuerzo galvanizado más allá de aquellos que se aplican al concreto con refuerzo convencional. En particular, la longitud del empalme es la misma para las barras de acero negro, al igual que la adherencia y consideraciones de transferencia de carga.

En efecto, la mejor práctica al utilizar el refuerzo galvanizado es usar apropiadamente el concreto diseñado y colocarlo como normalmente se usaría en todas las construcciones de concreto reforzado. Hay, por supuesto, algunas cuestiones que requieren consideraciones y un resumen estas se dan en las siguientes secciones.

#### **4.1 Agrietamiento del recubrimiento galvanizado.**

Una de las mayores preocupaciones de los ingenieros al usar barras galvanizadas en concreto reforzado es el agrietamiento del recubrimiento de zinc al doblarse y la consiguiente pérdida de la adherencia del recubrimiento sobre el acero base. Aliado a la preocupación por ello, es preciso señalar que los ensayos de doblado y re-doblado realizados de acuerdo a la norma BS449-1988 en barras de refuerzo galvanizadas producidas por tratamiento termo-mecánico, mostraron que todas las barras con diámetros en el rango entre 8 y 40 mm rindieron satisfactoriamente. Evaluaciones paralelas de las características de adherencia de estas barras indicaron que mientras algunos agrietamientos de la capa galvanizada ocurrieron en todos los diámetros de las barras, las barras de 40 mm mostraron mayor agrietamiento, el grado de la adherencia mejoró constantemente al reducirse el diámetro de la barra.

Se han observado fracturas en los dobleces ajustados (del orden de los 2d) en barras galvanizadas de alta resistencia, aunque es posible que tales barras se hayan agrietado antes de la inmersión. Para evitar tales fallas fue hallado un radio mínimo de 3d. Por lo general, las barras de alta resistencia a la tracción, deformadas y trabajadas al frío tienen baja ductilidad-generalmente alrededor de 40-70%- en comparación con las barras laminadas en caliente. Tales barras, y particularmente aquellas de gran diámetro, pueden agrietarse durante el doblado y se debe tener cuidado para evitar esto. Si van ser galvanizadas barras de alta resistencia a la tracción, deformadas y trabajadas al frío, se necesita tomar precauciones para evitar el posible riesgo de fragilización por hidrógeno a consecuencia de las operaciones de galvanización.

Muchos ensayos de doblado han mostrado que la extensión del agrietamiento y el ancho de las grietas en el recubrimiento de zinc están influenciados por los radios de doblado, los diámetros de las barras, el ángulo del doblado y el espesor del recubrimiento. En general, mientras más pequeños son los radios de doblado, más grandes son las grietas; y mientras más grueso es el recubrimiento, es mayor la intensidad del agrietamiento. El agrietamiento en el recubrimiento ocurrirá invariablemente en los ángulos rectos de la longitud de la barra y si el agrietamiento causa pérdida de adherencia local entre el recubrimiento y el acero base, la durabilidad del recubrimiento puede verse comprometida. Por tanto, en la práctica es más seguro galvanizar barras después del doblado, y esto debe considerarse especialmente cuando se trata de estribos.

La susceptibilidad a la corrosión de barras galvanizadas dobladas con recubrimientos agrietados ha sido investigada por más de dos años en 100% RH. Estas barras no mostraron productos de la corrosión en las grietas producidas al doblarse. Había también evidencia que los productos de la corrosión del óxido de zinc habían bloqueado las grietas en el recubrimiento previniendo, por tanto, corrosión localizada en el acero base. Las barras de acero negro que también fueron ensayadas mostraron una considerable corrosión local y herrumbre suelta. La experiencia ha demostrado que el recubrimiento de zinc tiene buena resistencia a la abrasión y al impacto durante el almacenamiento y los ensayos han demostrado que el transporte de las barras

galvanizadas y las operaciones normales de hormigonado no dañarán el recubrimiento. Además, los aceros galvanizados no se corroerán cuando sean expuestos a la humedad y al aire caliente.

#### 4.2 Propiedades mecánicas de las barras de acero

Pruebas de verificación exhaustivas durante muchos años han demostrado que la galvanización no afecta adversamente las propiedades estáticas de tracción (el límite elástico y resistencia a la tracción y alargamiento) de los aceros de grado típico para la construcción que no han sido excesivamente trabajados al frío, es decir, el doblado y re-doblado. Tales aceros incluyen barras de refuerzo de baja resistencia con un límite elástico de aproximadamente 250 MPa.

Con la introducción de barras de refuerzo de mayor resistencia, existe alguna evidencia que las primeras barras de alta resistencia torcidas en frío alrededor de 410 MPa, y que habían sido posteriormente dobladas durante la fabricación, se pudieron haber vuelto quebradizas por la galvanización. Sin embargo, este problema fue eliminado en los años 1970 con la introducción de aceros tratados termomecánicamente y aceros microaleados para barras de alta resistencia (límite elástico mínimo de 400 MPa) como reemplazos de acero de refuerzo torcido al frío. Recientemente, refuerzos de alta resistencia con un límite elástico hasta 500 MPa han sido introducidos y pruebas exhaustivas han verificado nuevamente que las propiedades mecánicas de este material no han sido afectadas adversamente por la galvanización. En la tabla 3 se presenta un resumen.

Tabla 3. Resumen de los tipos de acero de refuerzo.

Tipo de Acero	Consideraciones para la galvanización
Grados de baja resistencia - 250 MPa de límite elástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>ningún efecto en las propiedades mecánicas demostró que la barra no fue excesivamente trabajada al frío durante su fabricación.</li> </ul>
Aceros retorcidos al frío (Grade 410C) - 410 MPa de límite elástico mínimo	<ul style="list-style-type: none"> <li>al doblar el material trabajado en frío (es decir, al extender durante la fabricación por flexión) puede quebrarse mediante la galvanización.</li> <li>requiere un costoso tratamiento de estabilización</li> </ul>
Tratados termo mecánicamente o grados microaleados (Grado 410Y) - 410 MPa de límite elástico mínimo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>puede ser satisfactoriamente galvanizado sin necesidad de ningún requerimiento especial; y</li> <li>no hay ningún efecto significativo en la resistencia o ductibilidad.</li> </ul>
Barras de nueva generación con elevada resistencia (Grado 500N) - 500 MPa límite elástico mínimo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>después de la galvanización en caliente se mantienen propiedades mecánicas superiores; y</li> <li>las pruebas efectivamente mostraron una ligera mejora en el límite elástico, el límite de rotura y la ductibilidad.</li> </ul>

El zinc puro tiene baja resistencia a la fatiga y de esta manera la resistencia a la fatiga de las barras recubiertas de zinc se ve afecta más que sus propiedades estáticas. Esto puede ser motivo de preocupación en las estructuras diseñadas para resistir movimientos sísmicos y la posibilidad de fallas de las barras tensionadas. bajo tales condiciones, deben ser consideradas en el diseño.

Sólo existen resultados limitados disponibles de la resistencia a la fatiga de las barras galvanizadas. Pruebas de fatiga divulgadas en Alemania mostraron que las grietas de fatiga empezaron en la capa de zinc y esas múltiples grietas que ocurren de lado a lado, las cuales eventualmente penetran la capa de la aleación zinc-hierro y finalmente continúa hacia el acero. Se observó una reducción en la resistencia a la fatiga de aproximadamente el 15% - de 290 MPa a 250 Mpa aproximadamente-. Por otro lado, ensayos realizados en Finlandia, demostraron que la resistencia a la fatiga de ciertos aceros estructurales puede ser reducida hasta un 25% como resultado de la galvanización por inmersión en caliente y que la reducción es independiente del contenido de silicio del acero o el espesor de recubrimiento de zinc.

Sin embargo, por contraste, las pruebas de fatiga en barras galvanizadas extraídas de vigas de concreto reforzadas sujetas a constantes flexiones en una solución de cloruro por un periodo de 18 meses indicaron que sus resistencias a la fatiga fueron similares a aquellas barras sin recubrimiento y sin exposición al proceso de corrosión. En esencia, dichas pruebas pueden ser usadas para confirmar que la resistencia a la fatiga del refuerzo galvanizado en vigas de concreto y elementos similares no se ven afectados por la exposición de ambientes corrosivos.

### 4.3 Características de la adherencia y deslizamiento (referido al capítulo 8)

La adherencia entre el concreto y el refuerzo es esencial para desarrollar la capacidad completa del refuerzo y es la propiedad más importante que contribuye al funcionamiento exitoso de un sistema de concreto reforzado. Las tensiones que se desarrollan en el concreto circundante son complejas y son afectadas por muchos factores, incluyendo:

- la resistencia del concreto;
- el diámetro de la barra;
- la existencia (o no) de deformaciones en la superficie de la barra (las llamadas nervaduras);
- la geometría de las mismas nervaduras;
- la presencia o ausencia de refuerzo confinado;
- la cubierta del refuerzo; y
- la posición de las barras en la estructura.

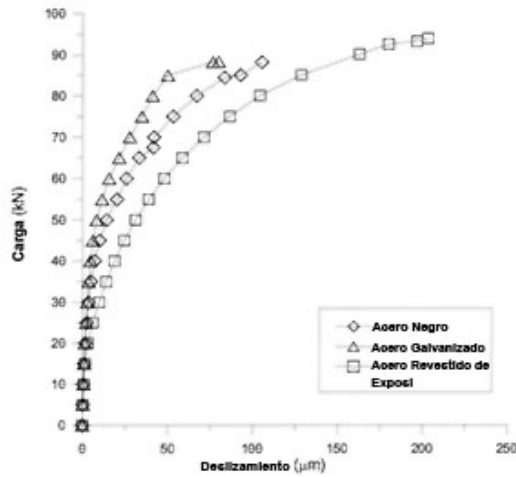
El principal contribuyente a la fuerza de adherencia es si las barras tienen nervaduras. Si las barras son lisas, lo que más contribuye a la resistencia de adherencia proviene de la adhesión química y la resistencia a la fricción que ocurre entre la barra y el concreto. Sin embargo, si las barras tienen acanalados, dos fuentes adicionales de la fuerza de adherencia se vuelven más significativas. Estos son la capacidad de soporte del concreto entre los corrugados y la resistencia al corte de la superficie cilíndrica de concreto localizada entre los corrugados.

En el uso del refuerzo galvanizado, el fundamento relacionado a cuestiones de la adherencia y el comportamiento del deslizamiento tienen que ver con la existencia de alguna diferencia significativa con el comportamiento de las barras de acero negro convencionales, y cuál es el efecto, si lo hay, de la presencia del recubrimiento de zinc y si existe alguna consideración especial a tomar en cuenta en el diseño.

Se ha emprendido una cantidad significativa de investigaciones con relación a estos temas. Algunas observaciones y resultados de esta investigación son las siguientes:

- el tiempo para desarrollar plenamente la fuerza de adherencia de las barras galvanizadas, en algunas circunstancias, puede ser más prolongado que la del acero negro, aunque este efecto es por lo general superado antes de los 28 días de curado;
- barras lisas galvanizadas tienen una fuerza de adherencia superior equivalente a la de las barras de acero negro, aunque en algunos casos no tan buena como la de las barras de acero picadas y oxidadas, lo cual indica la sensibilidad de la fuerza de adherencia a la rugosidad de la superficie;
- no había una diferencia significativa en la última capacidad de adherencia de la barra de acero negro corrugado o barras de acero galvanizado, y
- en los ensayos de las vigas, en última instancia en la carga, no hubo diferencia significativa en el deslizamiento de barras galvanizadas y barras de acero negro. En las cargas intermedias hubo una reducción notable en el deslizamiento para barras galvanizadas comparadas con las barras de acero negro como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Datos de carga de deslizamiento para barras corrugadas de acero negro, galvanizadas y recubiertas con pinturas epóxicas.



Lo que está claro es que la adherencia de la barra galvanizada no es menor que el equivalente de la barra de acero negro; en realidad puede ser más alta que la del acero negro. Múltiples estudios comparativos realizados en la Universidad de California (ver Figura 11) muestran claramente este efecto. Sin embargo, a pesar de la claridad de estos resultados existe un número de interrogantes que surgen cuando se va a emplear el refuerzo galvanizado. Estos se refieren principalmente a los efectos que puede tener la evolución del hidrógeno, como consecuencia de la reacción entre el zinc y el cemento húmedo, sobre la capacidad de adherencia, y el empleo de los cromatos para superar este problema percibido.

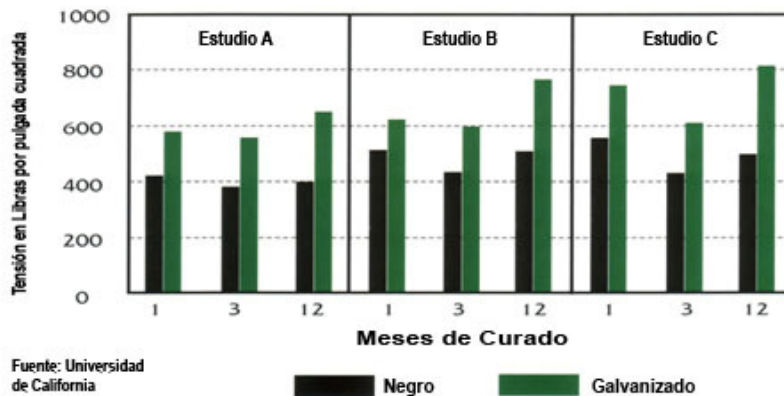


Figura 11. Comparación de la fuerza de adherencia entre las barras galvanizadas y barras de acero negro.



### 4.3.1 El fenómeno de la evolución del hidrógeno

Cuando el acero galvanizado hace contacto con el cemento húmedo (es decir, con el concreto recién colocado), se produce una reacción química que da como resultado la formación de cristales de hidroxizincato de calcio, los cuales precipitan y finalmente pasiva la superficie de zinc. Esta reacción está acompañada por la evolución de hidrógeno gaseoso. Mientras sucede esta reacción, el hidrógeno se acumula en pequeñas burbujas, que lentamente se mueven hacia arriba (debido a efectos de flotabilidad) y se alejan de la interfase zinc-concreto. Debido al poco tiempo de esta reacción, la cual no puede durar más de una hora y que efectivamente termina una vez que el cemento empieza a endurecerse, sólo se producen pequeñas cantidades de hidrógeno.

En la masa de concreto con cantidades significativas de agregado grueso y entrada de aire, las burbujas de hidrógeno están bien distribuidas en el concreto que rodea la barra y rara vez pueden identificarse por separado. En el caso de concreto de peso ligero con fracciones de bajo volumen de agregado grueso, tal como puede ser usado en los prefabricados, lo que posibilita que las burbujas acumulen y lleguen al recubrimiento del concreto. En algunos casos, esto puede dar lugar a variaciones de textura del concreto en la superficie de los paneles prefabricados que puede ser estéticamente indeseable.

Si bien la evolución del hidrógeno es teóricamente posible, los efectos prácticos de este son generalmente exagerados. En particular, las preocupaciones se expresan frecuentemente respecto a que la evolución del hidrógeno reducirá la fuerza de adherencia de las barras galvanizadas en el concreto. Este asunto ha sido materia de muchas investigaciones que casi han demostrado universalmente que no había reducción en la fuerza de adherencia de las barras galvanizadas comparadas con el equivalente de acero negro.

Un aspecto importante de esta investigación fue que la evolución del hidrógeno del acero galvanizado inmerso en pasta de cemento Portland se produce en superficies donde el hierro y el zinc están en contacto, pero no en la superficie de zinc puro. Esto supone que las capas de aleación de zinc y hierro que están cerca de la superficie del recubrimiento iniciaron la formación de hidrógeno. Como tal, no se esperaba que la evolución del hidrógeno sea significativa si la capa exterior del recubrimiento es predominantemente zinc puro, lo que es una situación que usualmente ocurre en la galvanización por inmersión en caliente de aceros no reactivos. Por lo tanto, para prevenir la formación de hidrógeno, es necesario mantener la presencia de la capa de zinc puro al menos la primera hora del concreto fresco que está en contacto con el acero galvanizado. Generalmente, los recubrimientos galvanizados brillantes suelen tener este tipo de estructura y entonces la probabilidad de tener una cantidad significativa de hidrógeno evolucionando en la superficie que es relativamente bajo.

Cabe señalar que la evolución del hidrógeno desde la superficie del recubrimiento puede eliminarse efectivamente si el recubrimiento es pasivado por otros medios. Esto puede lograrse mediante el tratamiento de acero recién galvanizado con una variedad de sustancias químicas, de los cuales los más comunes son las sales de cromatos.

### 4.3.2 El papel del Hidroxizincato de Calcio

El hidroxizincato de calcio que se forma en la superficie del recubrimiento debido a la reacción entre el zinc y el cemento húmedo es conocido por contribuir positivamente a la adherencia entre el refuerzo y el concreto circundante. Exámenes microscópicos detallados han demostrado que particularmente este producto de hidratación actúa como un anclaje entre el recubrimiento y el concreto que lo rodea, por lo tanto refuerza el nivel de adhesión de la barra. Este efecto está confirmado cualitativamente en la observación de que la mezcla de cemento Portland se adhiere firmemente al zinc y cuando está totalmente

endurecido llega a ser muy difícil de quitar sin dañar el metal. Igualmente, es bien conocido lo difícil que es quitar el concreto endurecido de las barras galvanizadas, un proceso que se produce fácilmente con las barras de acero negro.

Ahora existen muchas evidencias de que la adherencia entre el zinc y la pasta de cemento es relativamente más fuerte que entre el acero y la pasta. Lo que razonablemente se puede deducir de ello es que la fuerza de adhesión obtenida con la formación de hidroxycincato de calcio sobre la superficie galvanizada podría compensar bien cualquier pérdida potencial de adherencia con la evolución del hidrógeno. Esto bien podría explicar ampliamente la comparación reportada entre las barras de acero negro y las barras galvanizadas en lo que se refiere a la fuerza de adherencia expuesta anteriormente. Además, el grado de la adherencia entre el acero galvanizado y el concreto, aunque no es un gran componente de la fuerza de adhesión total, contribuyen claramente a la adherencia y también explica el deslizamiento reducido de las barras galvanizadas que se muestra en la Figura 9.

### 4.3.3 La práctica del tratamiento con cromato

La prevención de generación de hidrógeno en las superficies del acero galvanizado, que impide la reacción entre el refuerzo recubierto de zinc y el cemento Portland húmedo, se puede lograr mediante la aplicación de una solución diluida de cromato en las superficies. La norma ASTM A767 incluye dicho requisito y en la norma ISO14657 se afirma que "si está especificado por el comprador, el recubrimiento galvanizado deberá ser tratado con cromato".

La denominada pasivación con cromato se puede lograr mediante la aplicación de las soluciones directamente a las barras galvanizadas, generalmente a través del enfriamiento de las barras galvanizadas recientemente en una solución que contenga 0,2% de dicromato de sodio en agua (es decir, 2 kg por m<sup>3</sup> de agua) o por enfriamiento en una solución de ácido crómico con un contenido mínimo de cromato del 0,2%. La solución debe estar a una temperatura de al menos 32° C, y la barra tiene que estar sumergida por lo menos durante 20 segundos. Si la barra se encuentra a una temperatura ambiente (es decir, se ha enfriado naturalmente después de galvanizar), se debe añadir a la solución ácido sulfúrico con una concentración entre 0.5 y 1.0% para activar las barras. Un método alternativo consiste en añadir cromatos a la mezcla de concreto con agua en forma de dicromato sodio o de potasio a una concentración de 70 ppm, expresada como CrO<sub>3</sub> de la masa de cemento. Esto es equivalente a 104 g de dicromato de sodio hidratado puro /tonelada de cemento o 103 g de dicromato de potasio puro/tonelada de cemento.

La ventaja de la propuesta de agregar a la mezcla del concreto con agua es que esta asegura que el producto galvanizado se pasivice en el momento que se vacía el concreto. Para la barra que esta pasivizada inmediatamente después de la galvanización y luego es fabricada, transportada y almacenada en el lugar, no puede haber ninguna garantía de que la película pasiva permanezca en la superficie en el momento del vaciado. Existen numerosas pruebas disponibles que demuestran que la película de pasivación con cromato sobre la superficie de zinc se deteriora con el tiempo en función de la naturaleza y la gravedad de su exposición. También es preciso señalar que, a nivel práctico el uso de cromatos, ya sea para baño de enfriamiento o la mezcla de agua con concreto, no es bien recibido en la actualidad. Aparte de los altos costos de procesos e inconvenientes en general, existen serias ocupaciones sobre temas de salud y seguridad, y también las preocupaciones ambientales, con el uso de sales de cromo. Como tal, el uso de sales de cromato en muchas partes del mundo está siendo severamente restringido y riguroso con las regulaciones ambientales que se han puesto en marcha.

La investigación también ha demostrado que las pequeñas cantidades de cromato que se presentan en la mayoría de los cementos son suficientes para pasivizar las superficies

galvanizadas, provistas con una cantidad de al menos 20 ppm en la mezcla final del concreto. Indirectamente, este efecto ha ofrecido otro modo para la pasivación de la barra galvanizada, aunque no se encuentra controlado o es necesariamente fiable, ya que la cantidad de cromatos que naturalmente existen en el cemento no varía mucho (menos de 2-3 ppm a 500 ppm). Recientemente varios países han introducido regulaciones para limitar el nivel residual de cromato en el cemento a menos de 2 ppm. En estas circunstancias, no se debe confiar en la auto pasivación a través de los cromatos residuales en el cemento.

El efecto de la pasivación con cromato sobre la adherencia de barras galvanizadas ha sido investigado ampliamente. Los resultados de estas investigaciones varían mucho, algunos muestran un beneficio significativo del tratamiento de cromato, otros no presentan beneficios e incluso hubo una reducción en comparación a las barras tratadas sin cromatos. Una posible explicación de esta variación es que el zinc tiene un ligero efecto de retraso sobre el endurecimiento del concreto y, es así que las pruebas iniciales llevadas a cabo en tiempos muy cortos (por ejemplo, siete días de curado) pueden no haber desarrollado aún su capacidad total de adhesión y erróneamente dan resultados bajos o engañosos. Para tener en cuenta este efecto, se recomienda que todas las pruebas de adherencia usen barras galvanizadas que no hayan sido conducidas antes de los 28 días de curado, que al comparar las propiedades mecánicas coincidan con las barras de acero negro.

Si el tratamiento con cromato tiene un efecto beneficioso o no, el resultado más común de este tipo de prueba confirma que la fuerza de adherencia de la barra galvanizada tratada sin cromato es consiste y significativamente más alta que la barra de acero negro equivalente. Parece ser que la superioridad de las barras galvanizadas tratadas sin cromato se atribuye a la formación interrumpida de los cristales de hidroxizincato de calcio que crece perpendicularmente en la superficie galvanizada que actúa como una llave mecánica en el concreto circundante. Del mismo modo, en estudios a largo plazo (a diez años) de la adherencia del refuerzo galvanizado en concretos contaminados con cloruro, se constató que no hubo pérdida de la adherencia del acero galvanizado después de una exposición prolongada ante los cloruros y además, no hubo un efecto significativo de la adición de cromato en comparación a las barras galvanizadas no tratadas. Este trabajo también indicó que la generación de burbujas de hidrógeno (en ausencia de tratamiento con cromato) no tiene un efecto significativo sobre la fuerza de adherencia.

En otros trabajos que compraban las barras lisas de acero negro, barras galvanizadas y con recubrimiento epóxico, no hubo una diferencia estadísticamente significativa en la última fuerza de adherencia de las barras lisas de acero negro y las barras galvanizadas, mientras que algunas de las barras recubiertas con pintura epóxica se encontraban en 26% menos. Además, la adición de cromatos en la mezcla de agua (35-150 ppm por peso de cemento) aumentó significativamente la fuerza de adherencia de las barras galvanizadas con el mayor incremento (alrededor del 38%) para las adiciones de 35 ppm (véase Figura 12). En trabajos relacionados con la comparación de las barras de acero negro y las barras galvanizadas ya sea sin tratar o tratadas con soluciones de dicromato de sodio, las barras galvanizadas fueron 50% superior en fuerza de adherencia que las barras de acero negro lisas, y el tratamiento de dicromato de sodio para la barra antes de la colada no produjo ninguna diferencia significativa en comparación con las barras galvanizadas sin tratar.

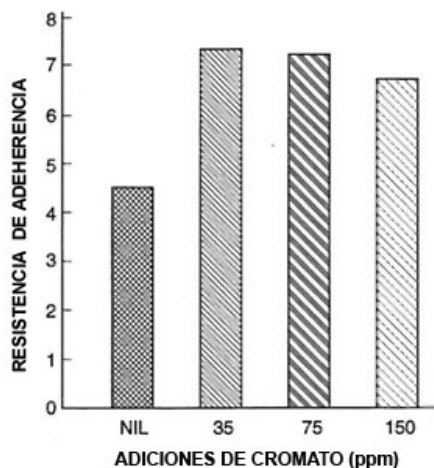


Figura12. El efecto de las adiciones de cromatos en la mezcla de concreto sobre la fuerza de adherencia de las barras galvanizadas.

Esta mezcla hace evidente que, en primer lugar, la galvanización de la barra de refuerzo de acero no tiene ningún efecto nocivo sobre la fuerza de adherencia, en todo caso, mejoraría la adherencia. Además, la práctica del cromatizado del refuerzo, ya sea por la aplicación directa a las superficies de acero o a la mezcla del concreto, no es del todo necesaria. Esto se debe a que el cromatizado no reduce la capacidad de adherencia y, en todo caso, ésta aumentaría probablemente más. Dado que la adherencia de la barra galvanizada es normalmente superior a la de la barra de acero negro, y la presencia de cantidades menores de hidrógeno no tiene ningún efecto notable, el beneficio adicional obtenido del cromatizado es innecesario.

Con formato: Justificado

Cabe señalar que el abandono de esta práctica también se ajustaría los requisitos de salud y medioambientales en muchos países, así como, hacer de la manipulación y del uso del acero galvanizado mucho más seguro, más fácil y posiblemente más barato. Hasta cierto punto, el enfoque adoptado en la norma ISO 14657, al permitir una opción para la pasivación con cromato, reconoce estas tendencias en la investigación reciente que indica que la pasivación con cromato no es realmente necesaria.

## 5. La Naturaleza Electroquímica del Acero Galvanizado (referido al capítulo 5)

El acero en el concreto está protegido contra la corrosión mediante un mecanismo de pasivación. La razón de esta pasivación es la alta alcalinidad de la solución del poro del concreto, cuyo pH en el concreto hidratado es mayor de 12.5. Durante el primer período corto después de mezclar, la solución que llena los poros del concreto está sobresaturada en  $\text{Ca(OH)}_2$ . Más tarde, se alcanza el equilibrio con las otras especies como el NaOH, KOH y  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . El valor del pH de esta solución acuosa varía entre 12 y 14 en función del contenido del álcali del cemento y el grado de hidratación. Una característica particular de estas soluciones alcalinas, que es relevante para el comportamiento del zinc, es que la concentración de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuye cuando aumenta el pH. La importancia de esto es que la presencia de  $\text{Ca}^{+2}$  es necesaria para la pasivación del zinc en soluciones alcalinas.



## 5.1 Formación de la película pasiva

Bajo condiciones altamente alcalinas del concreto una capa microscópica de óxido se forma en la superficie del acero de refuerzo, la denominada película pasiva. Esta película pasiva impide la disolución del hierro y de este modo la corrosión del refuerzo del acero es severamente limitada, incluso en presencia de la humedad. En el caso del zinc, la situación es diferente al acero puesto que el zinc es un metal anfótero. Esto significa que el zinc es estable sobre una amplia gama de pH, de aproximadamente de 6 a 12.5, pero debajo y por encima de estos valores la velocidad de corrosión aumenta exponencialmente como se muestra en la Figura 13.

Con formato: Justificado

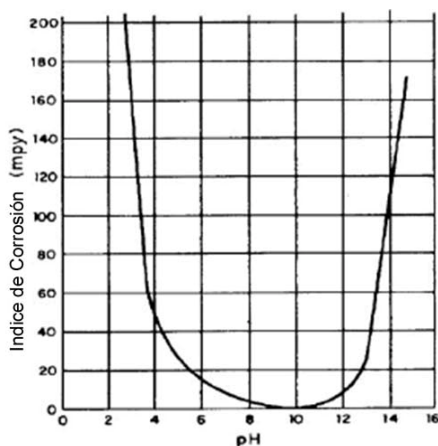


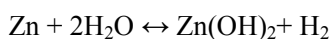
Figura 13. Velocidad de corrosión del zinc en función del pH del medio ambiente

El comportamiento del zinc tanto en soluciones alcalinas débiles y como fuertes se ha estudiado ampliamente. Algunas conclusiones importantes de este amplio trabajo son las siguientes:

Con formato: Justificado

- debajo de cierto contenido del  $\text{OH}^-$ , el primer producto anódico es el  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , mientras que por encima de pH 12.9 el producto principal es el ión zincato soluble ( $\text{ZnO}_2^{2-}$ );
- en un intervalo del pH entre 12 y  $13.2 \pm 0.1$  el recubrimiento galvanizada se corroe a baja velocidad que es aceptable;
- a pH por debajo de 12 tiene lugar la corrosión localizada, mientras por encima de pH 13.2 se produce la disolución total del recubrimiento sin pasivación;
- el umbral para el inicio de la evolución del hidrógeno está en el pH  $12.8 \pm 0.1$ ; y
- el producto de corrosión que causa la pasivación del zinc en soluciones alcalinas ricas en calcio es el hidroxizincato de calcio ( $\text{CaHZn}$ ).

Un mecanismo de dos etapas para la formación de  $\text{CaHZn}$  se ha dado como:



luego



En cual también se observó que el  $\text{ZnO}$  y el  $\epsilon\text{-Zn}(\text{OH})_2$  se formaron durante el proceso de la corrosión.

Como se ha señalado, se descubrió que el acero galvanizado se vuelve pasivado en un valor de pH debajo del  $13.2 \pm 0.1$ . En esta circunstancia, la película de pasivación era hidroxizincato de calcio, pero también se observó que su morfología variaba con el pH de la solución en la cual se formó. También se identificó la existencia de los productos de corrosión insolubles previamente mencionados como el  $\text{ZnO}$  y el  $\epsilon\text{-Zn}(\text{OH})_2$ , aunque no se observó ninguna propiedad pasivante con el producto  $\text{ZnO}$ . Debe observarse que una vez que se forma la película pasiva de hidroxizincato de calcio, su estabilidad no sea alterada incluso si el pH aumenta hasta un valor de  $13.6 \pm 0.1$ .

Con formato: Justificado

En relación con la morfología de la capa de pasivación, el análisis de los productos de corrosión del acero galvanizado en soluciones alcalinas ricas en calcio demuestra que cuando el pH está alrededor de 12.6, la superficie es cubierta totalmente después de dos o tres días, principalmente por los cristales  $\text{CaHZn}$  como se muestra en la Figura 14. Su apariencia es la de una alfombra muy compacta de cristales. Según aumenta el pH así también lo hace el tamaño del cristal de  $\text{CaHZn}$  al punto que los cristales no pueden cubrir totalmente la superficie y, bajo estas condiciones, la pasivación total de la superficie no es posible y la disolución continúa a una alta velocidad de corrosión.

Con formato: Justificado

Incluso en valores de pH más elevados (por encima de 13.5), los cristales  $\text{CaHZn}$  llegan a ser muy gruesos y crecen como cristales aislados (ver Figura 15). La razón de esto es que en valores de pH por encima 13.2, la concentración de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución se agota. En estos valores de pH elevados, debido a la formación de la capa pasivante de cristales de  $\text{CaHZn}$  se ve obstaculizada, la disolución del zinc no es retardada y como consecuencia el recubrimiento galvanizado puede disolverse totalmente en un corto período de tiempo.

Con formato: Justificado

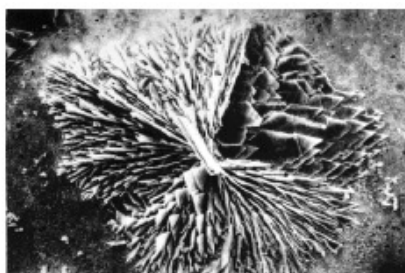


Figura 14. Cristales  $\text{CaHZn}$  después de 24 h en solución  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de pH 12.6.



Figura 15. Cristales  $\text{CaHZn}$  después de 10 días en solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{KOH}$  de pH 13.24.

## 5.2 La Evolución del Hidrógeno

Simultáneamente con los procesos de la pasivación del acero galvanizado en el concreto, se lleva a cabo la evolución del hidrógeno a lo largo de la superficie de la barra. La reacción inicial entre el zinc y los medios alcalinos es vigorosamente fuerte. Sin embargo, disminuye constantemente con el tiempo debido a la formación continua de la capa superficial de  $\text{CaHZn}$  que llega a ser eventualmente continua en la superficie con el endurecimiento de la pasta del cemento.

Los estudios electroquímicos han revelado que si bien la generación de hidrógeno es común, la duración total de la reacción depende de dos factores:

Con formato: Justificado

- el contenido de cromo del cemento el cual varía considerablemente en diferentes tipos de cemento y puede suprimir totalmente la evolución del hidrógeno; y

- el contenido del álcali del cemento y por consiguiente el pH de la solución de los poros.

Según lo mencionado anteriormente, la consecuencia principal de la evolución del gas de hidrógeno es la formación de burbujas en la interfaz de la barra/concreto que es responsable de una cierta pérdida de la adherencia del refuerzo galvanizado cuando no se realiza ninguna adición del cromo al concreto o cuando no se realiza separadamente la pasivación con cromato de las barras. Sin embargo, esta disminución en la zona del contacto en el interfaz es solo transitoria, como la formación de los cristales de  $\text{CaHZn}$  llena progresivamente estos vacíos, por lo que este efecto es de menor importancia.

Con formato: Justificado

### 5.3 Influencia del contenido de álcali

El componente del cemento que más influye en el comportamiento del zinc en medios alcalinos es el contenido de álcali ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ). Estos iones de álcali se incorporan en el cemento en diversas proporciones en función de las materias primas y de los combustibles empleados para la fabricación del cemento. Ellos generalmente están presentes en forma de sulfatos alcalinos.

Con formato: Justificado

Diferentes cementos pueden producir diversas soluciones de poros debido a la presencia de iones de álcali, los cuales son los componentes más solubles y responsables del pH final de la solución de los poros. Se ha determinado que la velocidad de corrosión del refuerzo galvanizado embebido en morteros hechos con varios tipos de cemento por lo general aumenta con el incremento de los valores de pH de los cementos, indicando un umbral de pH para el zinc en soluciones porosas del concreto entre pH 12.8 y  $13.2 \pm 0.1$ . Por encima de este límite de pH, la velocidad de corrosión desarrollada es muy alta, con un riesgo de disolución del recubrimiento galvanizado.

Con formato: Justificado

Esta relación entre el contenido de álcali del cemento y la velocidad de corrosión puede explicar los diversos comportamientos observados y la duración de los recubrimientos galvanizados en el concreto. El tipo de cemento en contacto con la galvanización es muy importante porque permite la formación de una capa pasivante compacta de  $\text{CaHZn}$ . Esto también puede explicar algo del comportamiento variable del refuerzo galvanizado cuando no se ha considerado el tipo de cemento.

Con formato: Justificado

Lo que esta claro es que la capa de pasivación de productos de corrosión formados durante las primeras horas después de la mezcla, cuando el valor del pH de la solución en los poros del concreto es más bajo que  $12.8 \pm 0.1$ . Si el pH se encuentra alrededor de 12.8 y 13.2, la capa de pasivación se produce lentamente y el recubrimiento galvanizado puede continuar disolviéndose hasta alcanzar la pasivación total. En un pH más alto, la capa pasiva no se desarrolla y el recubrimiento galvanizado puede disolverse continuamente. Sin embargo, afortunadamente los valores de pH mayores de 13.2 no se desarrollan en soluciones porosas del concreto durante las primeras horas luego de la mezcla si se utiliza el sulfato como un regulador o si hay suficientes sulfatos alcalinos. Mientras que los iones de sulfato están presentes en la solución porosa, el valor de pH no aumenta más allá de 13.2. Solamente cuando los sulfatos desaparecen de la solución, debido a la formación de los sulfoaluminatos, logra que el pH se incremente a un valor máximo lo cual está en función del contenido total de álcali. Esto generalmente ocurre varias horas o días después de la mezcla, por el cual la capa de pasivación de  $\text{CaHZn}$  lo tiene todo formado, como consecuencia el aumento en el pH no es perjudicial para el recubrimiento galvanizado.

### 5.4 Influencia de la estructura del recubrimiento galvanizado

Como observamos anteriormente, la estructura de la capa de aleación del recubrimiento galvanizado depende de la composición del acero base y también de la temperatura y composición del baño por inmersión en caliente, así como, del tiempo en el baño de galvanización.

Lo que se conoce es que la presencia de diferentes microestructuras tiene un efecto significativo en la estabilidad del recubrimiento galvanizado en contacto con las soluciones alcalinas. Esto es lo más importante porque es la capa exterior de zinc puro ( $\eta$ ) que provee la pasivación más efectiva, mientras que las capas subyacentes de Fe-Zn son menos estables particularmente ante la presencia de los cloruros, que los atacan selectivamente originando la desintegración progresiva del recubrimiento.

La naturaleza del ataque en el recubrimiento galvanizado durante la pasivación es por la disolución de la capa externa de zinc en los recubrimientos galvanizados convencionales. Mientras que para los recubrimientos galvanizados y recocidos, las capas de aleación de Fe-Zn se desintegran por el ataque selectivo en el que el zinc se usa para desarrollar la capa de CaHZn. De las observaciones de este tipo se ha deducido que los recubrimientos galvanizados deben tener suficiente reserva de capa de zinc puro (con un espesor alrededor de 10  $\mu\text{m}$ ) para permitir el desarrollo de una perfecta película de pasivación del hidroxizincato de calcio.

## **6. Comportamiento del Acero Galvanizado en el Concreto (referido a los Capítulos 1,4,5)**

Como se mencionó anteriormente, hay dos temas principales que necesitan ser tratados por separado cuando se considera el comportamiento del refuerzo galvanizado en el concreto. El primero es el efecto de la carbonatación y el segundo es el efecto del ión cloruro.

### **6.1 Concreto Carbonatado**

La carbonatación o neutralización de la cobertura de concreto es una de las principales razones para la corrosión del refuerzo. El pH de la fase acuosa cambia desde alcalino elevado hasta valores alrededor de la neutralidad (pH 7). En referencia a la Figura 12, está claro que a un pH cercano al neutro la velocidad de corrosión del zinc es muy bajo, por eso, se esperaría que el recubrimiento galvanizado se comporte así.

Muchas investigaciones y observaciones de campo han demostrado que la carbonatación no incrementa significativamente la velocidad de corrosión de las barras galvanizadas en el concreto y en algunos casos hasta se reduce. La observación general revela que el acero galvanizado no se corroe en el concreto carbonatado.

En estudios, donde velocidad de corrosión del refuerzo galvanizado embebido en los morteros carbonatados y sin carbonatación es medido con los cambios de la humedad relativa, se observó que antes de que el concreto sea carbonatado, el acero galvanizado muestra altas velocidades de corrosión, debido a que el recubrimiento ha sido consumido al formar la capa protectora de CaHZn. Aunque la velocidad de corrosión disminuye significativamente al comienzo de la carbonatación y la reducción del RH. Una vez que el concreto es carbonatado, es posible que el recubrimiento galvanizado se despase con el consiguiente incremento de la velocidad de corrosión. Sin embargo, lo que se observa en estas circunstancias, aunque después de un corto tiempo, es una fuerte disminución de la velocidad de corrosión. Esto ha sido atribuido a la formación de una nueva capa pasivada probablemente debido a la precipitación de los carbonatos de zinc en la superficie.



## 6.2 La Presencia de los Cloruros

Los cloruros son los iones más agresivos para el concreto reforzado y es la causa más frecuente del deterioro del refuerzo. Los cloruros están presentes en el concreto de dos formas: primero, desde la mezcla como parte de las materias primas (agua, agregados o como un aditivo); y segundo cuando se introducen desde ambientes marinos o del uso de sales de deshielo. En ambos casos el ataque producido en el refuerzo es localizado, el cual origina una reducción de la sección transversal del refuerzo de acero.

Para el acero negro, la corrosión se inicia cuando se alcanza el valor límite del ión cloruro en la solución de los poros. Este umbral de concentración depende, entre otros factores, del pH y de los incrementos según aumenta el pH. El Instituto Americano de Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) ha publicado los límites recomendados para el cloruro en concreto, en contacto con el acero negro como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites recomendados según el ACI para los cloruros en concreto.

Tipoff de exposición	Límite del cloruro
Concreto pretensado	0.06
Concreto reforzado convencional – ambiente húmedo y expuesto a cloruros externos.	0.10
Concreto reforzado convencional – ambiente húmedo pero no expuesto a cloruros externos.	0.15
En edificaciones donde el concreto se quedará seco permanentemente.	No hay límites

*Comité 20 del ACI, Guía para el Concreto Durable, Capítulo IV, 1994.*

*Límite expresado como porcentaje por peso de cemento.*

Cabe señalar que estos valores no son necesariamente el límite del cloruro; más bien son límites conservadores recomendados. En la mayoría de las especificaciones se recomienda un contenido de cloruro que contenga menos de 0.2% del contenido de cemento (o 0.6 kg/m<sup>3</sup> de concreto) para un riesgo bajo de corrosión. Este valor, frecuentemente se reporta como el límite del cloruro.

En cambio, no existe un acuerdo universal sobre la resistencia del ataque del cloruro del refuerzo galvanizado. Sin embargo, lo que parece claro, es que mientras que el zinc también es afectado por los cloruros, se necesita límites de cloruro un poco más alto. La Figura 16 muestra una comparación del rango del potencial y las concentraciones de ión de cloruro en Ca(OH)<sub>2</sub> solución saturada en la que el zinc muestra estabilidad del estado pasivo o corrosión por picadura. En efecto estos son los potenciales y la concentración del ión cloruro en los cuales ocurre el resquebrajamiento de la capa y la disolución anódica. A partir de estos datos se puede deducir que el zinc se vuelve susceptible al ataque por picadura en soluciones Ca(OH)<sub>2</sub> contaminadas con cloruros, en las concentraciones del ión cloruro de aproximadamente 0.45 M, mientras que el acero se corroe cuando las concentraciones del ión cloruro es superior a 0.08 M. Esto representa un límite de 5 o 6 veces mayor para el zinc sobre el acero negro en tales soluciones que simulan en parte a los poros de agua en el concreto.

Estos valores varían en el ambiente del concreto. Lo que se ha observado en una serie de investigaciones y en los resultados de los estudios de campo, es que el límite del cloruro para las barras galvanizadas es al menos de 2 a 2.5 veces mayor que para el acero negro, tanto como de 8 a 10 veces mayor.

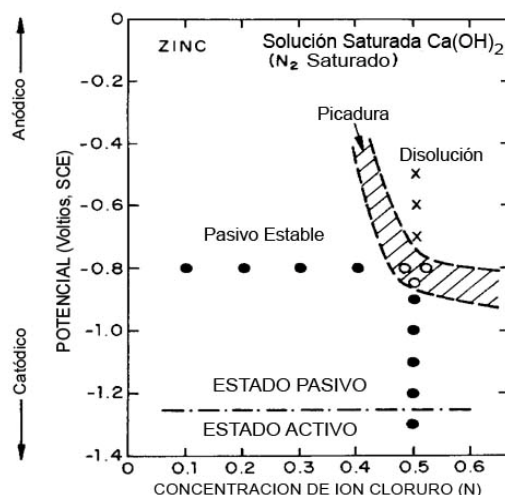


Figura 16. La corrosión del zinc en presencia de cloruros.

Lo que está claro también es que el comportamiento depende del origen de los cloruros y del estado de la superficie galvanizada.

### 6.2.1 Los iones de cloruro añadidos durante la mezcla

La adición del cloruro al agua de amasado produce cambios en el pH de la solución del poro, por ejemplo,  $\text{CaCl}_2$  produce una disminución del pH, pero el  $\text{NaCl}$  no lo altera significativamente. Cuando el cloruro de calcio se agrega a la mezcla, el índice de corrosión inicial puede ser más pequeño que sin aditivos aunque los periodos alternativos de activación y pasivación se producen antes de alcanzar la pasivación total.

Para  $\text{NaCl}$ , los datos para las barras de zinc puro muestran índices de corrosión más elevados que con  $\text{CaCl}_2$ , al menos en las etapas iniciales de la corrosión, que se atribuye al pH elevado producido por las adiciones de  $\text{NaCl}$ . Posteriormente, el estado de pasividad parece ser más perfecto con el  $\text{NaCl}$  que con el  $\text{CaCl}_2$ .

La microestructura galvanizada tiene también una importante influencia en la ausencia de la capa externa de zinc que produce velocidades de corrosión más elevados, mientras que las capas de aleación son menos resistentes a los ataques por cloruro que el zinc puro. En consecuencia, los recubrimientos galvanizados más resistentes son aquellos con capa externa más gruesa de zinc puro. Cuando se emplean las barras planas de zinc, se miden bajas velocidades de corrosión, mientras que los recubrimientos galvanizados y recocidos son destruidos catastróficamente cuando se emplean en concreto que contiene cloruro. De este modo, la parte más resistente del recubrimiento galvanizado es la capa externa de zinc, y la parte más débil (o menos resistente) son las capas de aleación subyacente.

### 6.2.2 Iones de cloruro que penetran desde el exterior

La resistencia del refuerzo galvanizado contra la penetración del cloruro depende de la compactación de la capa  $\text{CaH}_2\text{Zn}$  y de la microestructura del recubrimiento restante. Cuando los cloruros llegan al refuerzo, la capa de  $\text{CaH}_2\text{Zn}$  ya deberá estar formada. Por lo tanto, si es compacta y continua, y el recubrimiento restante tiene un espesor suficiente de la capa de zinc puro para resistir el ataque por picadura, el recubrimiento galvanizado resistirá también el ataque del cloruro. Sin embargo, cuando la capa de zinc es muy delgada y se consume al

formar la capa de  $\text{CaHZn}$ , cuando los cloruros llegan al refuerzo que se encuentran debajo de la capa  $\text{CaHZn}$  sólo las capas de aleaciones permiten un índice más elevado de ataque.

Si la cantidad de cloruros sigue aumentando, el umbral, aunque más elevado a la del acero desnudo, en última instancia puede ser alcanzado y la corrosión de las capas galvanizadas se desarrolla. Este retraso en el inicio de la corrosión con respecto al acero sin recubrir se conoce como la extensión de la vida en servicio del refuerzo proporcionado por la galvanización. Esto ha sido referido para barras galvanizadas en un rango de 4-5 veces más que para la corrosión del acero negro en condiciones de exposición equivalentes.

Con formato: Justificado

El tema de la extensión de la vida en servicio o durabilidad de los recubrimientos galvanizados pueden ser demostrado mediante un cálculo simple del tiempo para la corrosión del acero negro y el acero galvanizado en condiciones de exposición similares de acuerdo a lo siguiente:

- Para acero negro, asumir un valor umbral superior de 0.4%  $\text{Cl}^-$  por masa de cemento; y
- para acero galvanizado, asumir un umbral inferior de 1.0%  $\text{Cl}^-$  basado en datos de campo.

Con formato: Justificado

Para el cálculo, asumir una condición de exposición equivalente en un concreto marino:

Con formato: Justificado

- 0.35% de concentración de ión de cloruro en la superficie del concreto; con
- 30 mm para cubrir el refuerzo; y
- un coeficiente de difusión  $D = 1.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Con formato: Justificado

Sobre esta base, la Ley de Fick predice que la corrosión del acero negro de refuerzo se iniciará después de 15 años, mientras que para el acero galvanizado el ataque se iniciará después de 44 años. Esto indica una extensión teórica de la durabilidad de 3 veces para la barra galvanizada sobre la barra de acero negro.

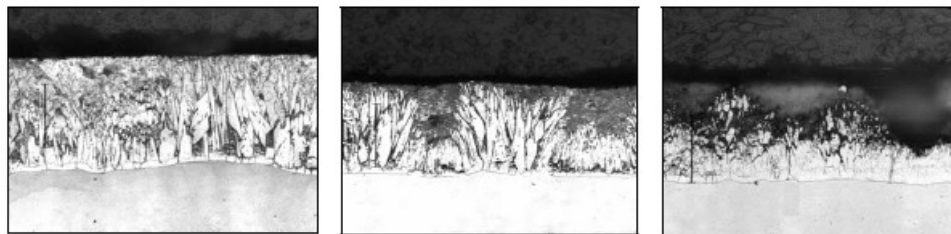
Este resultado es la confirmación clara de lo que se observó en una serie de estudios de laboratorio y de campo. Sin embargo, cabe señalar que además de la demora de la aparición de la corrosión, durante el transcurso del tiempo el recubrimiento galvanizado se disuelve y la duración de la estructura se extiende efectivamente. Los productos de corrosión que tiene carácter expansivo son los del acero base que conducen al inicio rápido del agrietamiento y descascarillamiento de la masa del concreto una vez que se inicia la corrosión. Este no es el caso de los productos de corrosión de zinc y, como tal, la extensión real de la vida del acero galvanizado es por lo general 3 veces más que el factor calculado anteriormente.

### 6.3 Comportamiento del recubrimiento y los productos de corrosión

La comprensión del mecanismo de la reacción del recubrimiento de aleación de zinc cuando se coloca en el concreto y las características de los productos de corrosión es fundamental para una apreciación completa de la protección contra la corrosión proporcionada por la galvanización del refuerzo. Una labor considerable se ha realizado por varios años para investigar estos efectos que incluyen la reacción de varias capas de la aleación del recubrimiento cuando están en contacto con el cemento húmedo, la naturaleza de los productos de corrosión que se forman cuando el zinc reacciona con el cemento.

Se ha observado mediante extensas investigaciones en esta área que la disolución del recubrimiento galvanizado difiere dependiendo del estado de la superficie galvanizada. Si el recubrimiento muestra una capa de zinc puro, primero se disuelve uniformemente y sólo después se produce un ataque localizado en las capas de aleación.

Mediante esta investigación se ha observado que cuando el recubrimiento galvanizado primero entra en contacto con el cemento húmedo y es pasivado inicialmente, se disuelve aproximadamente  $10\text{ }\mu\text{m}$  de zinc de la capa de zinc puro ( $\eta$ ) del recubrimiento. En la Figura 17 se puede ver este efecto en un acero galvanizado con un espesor de recubrimiento inicial de  $180\text{ }\mu\text{m}$  (Figura 17a) embebido en concreto contaminado sin cloruro por corto tiempo (Figura 17b). El espesor promedio del recubrimiento restante en esta etapa es  $164\text{ }\mu\text{m}$  y el recubrimiento queda con una superficie suave y brillante. Los estudios en barras galvanizadas recuperadas de estructuras de campo indican que el recubrimiento se mantiene en esta condición por periodos de tiempo más largos siempre que las condiciones en el concreto no cambien significativamente. En dichas circunstancias, se perderá muy poco metal hasta que el zinc sea despasivado y comience la corrosión activa.



a) Acero recién galvanizado con  $180\text{ }\mu\text{m}$  de espesor de recubrimiento de capa de aleación.

b) Barra galvanizada expuesta en concreto fresco que muestra pérdida parcial de la capa exterior de zinc puro. Recubrimiento restante  $\sim 164\text{ }\mu\text{m}$  de espesor.

c) Exposición al concreto contaminado con cloruro muestra pérdida de la capa de zinc puro con intrusiones alrededor de las capas de las aleaciones. Espesor de recubrimiento promedio  $\sim 110\text{ }\mu\text{m}$

Figura 17. Cambios en el recubrimiento galvanizado con exposición al concreto (200x).

Una vez que comienza la corrosión activa del zinc, generalmente por la acumulación de altos niveles de cloruro en el fondo del refuerzo, continúa la disolución de la capa de aleación  $\eta$  seguida de la disolución progresiva de las capas de aleación subyacentes como se muestra en la Figura 17c. Esta forma de ataque produce la formación de túneles y orificios profundos en las capas de aleación, particularmente alrededor y a través de la fase delta que comprende la mayor parte del recubrimiento.

Aunque parece que el recubrimiento se está desintegrando en esta etapa, una densa capa de las fases gamma y delta permanece intacta en la superficie de la barra y esto permite seguir protegiendo al acero subyacente contra la corrosión. Una vez que se pierde todo el recubrimiento en las pequeñas áreas de la superficie de la barra, el zinc continúa dando protección sacrificial en distancias de hasta aproximadamente  $8\text{ mm}$ . (tal como fue demostrado en un experimento). En la Figura 18 se muestran algunos ejemplos de este efecto.

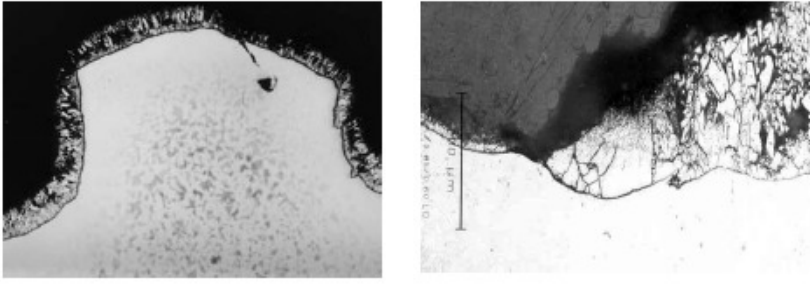


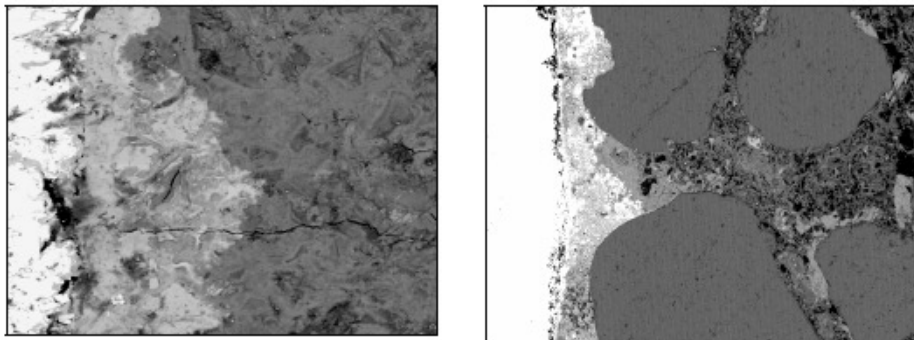
Figura 18. Se muestran áreas de acero expuesto en la barra galvanizada embebida que han sido protegidas catódicamente por el recubrimiento de zinc adyacente.

Se han realizado numerosos trabajos para identificar la naturaleza de los productos de corrosión y el efecto de estos en la masa de concreto. Una serie de minerales fueron identificados en los productos de corrosión, principalmente el óxido de zinc y el hidróxido de zinc. Una característica única de estos productos es que son minerales friables (suelos y pulverulentos), son menos voluminosos que los productos de corrosión con alto contenido de hierro y son capaces de emigrar de la barra al molde de concreto adyacente llenando vacíos y microgrietas. Esto se evidencia en la Figura 19 donde el penacho de los productos de corrosión con alto contenido de zinc se muestra de color blanco en contraste con la matriz de cemento con alto contenido de calcio de color gris.

Con formato: Justificado

En contraste con la situación hallada cuando se corroe el acero en el concreto, la presencia de los productos de corrosión de zinc produce muy poca ruptura física alrededor de la matriz, de ese modo se mantiene la integridad de la cubierta de concreto. Asimismo, se evidencia que la presencia de estos productos de corrosión y el llenado de espacios porosos en la matriz pueden crear una barrera de menor permeabilidad en la matriz, que no sólo aumenta la adherencia de la matriz a la barra sino que también puede reducir el paso de especies agresivas como los cloruros a través de la matriz a la superficie de recubrimiento.

Con formato: Justificado



a) Se muestra disolución parcial del recubrimiento galvanizado (izquierda) y la migración del penacho de los productos de corrosión con alto contenido de zinc (centro) a la matriz de cemento (1000x).

b) Migración de los productos de corrosión con alto contenido de zinc de la interfase barra/matriz a la matriz de cemento. Las partículas grandes son arena(100x)

Figura 19. Imágenes SEM de la zona interfacial entre la barra y la matriz que muestra la presencia de productos de corrosión (penacho blanco).

## 7. Estudios en Campo del Refuerzo Galvanizado (referido a los Capítulos 2, 6, 7)

Pruebas de aplicaciones en campo sustentadas por un cuerpo cada vez más amplio de datos experimentales ha demostrado que la galvanización extiende la durabilidad del refuerzo de acero en el concreto y protege contra el agrietamiento prematuro y las machas de óxido en el concreto. La protección contra la corrosión proporcionada por la galvanización se debe a la combinación de efectos beneficiosos. El límite de cloruro sustancialmente más alto para acero recubierto con zinc es sumamente importante en comparación con el acero convencional (negro). Además, el refuerzo galvanizado es resistente a los efectos de carbonatación de la masa de concreto. El efecto neto de la presencia de recubrimiento de zinc es que no sólo retarda el inicio del proceso de corrosión, sino también que continúa dando protección por efecto barrera durante el periodo en que el recubrimiento está reaccionando (es decir, disolviéndose) pero se mantiene intacto.

Lo que queda claro de las múltiples investigaciones realizadas es que la durabilidad del recubrimiento galvanizado, y por ende la fiabilidad de la protección anticorrosiva que brinda, depende de la morfología y el espesor del recubrimiento, de la calidad del concreto donde esta colocada y de la severidad del ambiente donde esta expuesto el concreto. Además, en circunstancias donde el acero subyacente esté expuesto, como en las rupturas en el recubrimiento o en bordes cortados, el zinc brinda protección sacrificial al acero, y de este modo se extiende la vida en servicio o durabilidad del refuerzo.

Se han realizado numerosas investigaciones en los Estados Unidos, especialmente para investigar el refuerzo galvanizado para puentes de concreto y la construcción de carreteras expuestas a niveles altos de cloruro acumulado debido a la aplicación de sales descongelantes o por exposición marina. Por ejemplo, en el caso de refuerzos de zapatas superiores e inferiores para cubiertas de puentes, cuando las barras de zapatas superiores e inferiores estaban galvanizadas, resultaron densidades de corriente de corrosión muy bajas comparado con el acero negro, y la extensión de la corrosión sobre las barras galvanizadas era significativamente menor sin ningún producto de corrosión ferrosa (es decir, óxido rojo) visible. Se ha demostrado que cuando se utilizaron barras galvanizadas sólo en la zapata superior y con zapatas inferiores de acero negro, se produjo corrosión significativa del zinc aunque con mucha menor corrosión con óxidos de color rojo en comparación con las barras negras en condiciones equivalentes.

Otro trabajo ha indicado que para concreto de 0.5 a/c (relación agua/cemento), las barras galvanizadas tuvieron mejores resultados que las barras negras, aunque en concreto de 0.4 a/c, se dieron resultados similares en ambas barras después de exposición cíclica por 8 años, y no se pudieron hacer comparaciones significativas. Se observó también que el peor caso de corrosión sucedió cuando las barras galvanizadas de la zapata superior en concreto con alto contenido de cloruro estaban acopladas a barras de acero negro en concreto relativamente libre de cloruro en el fondo de la placa; el mejor caso fue cuando se usaron barras galvanizadas tanto en las zapatas superiores como inferiores.

Mediante otros datos también se ha verificado la mejora en el comportamiento en campo del refuerzo galvanizado tanto en aplicaciones marinas como en cubiertas de puentes. Las inspecciones de muchas estructuras de varios años de exposición en diversas calidades de concreto (a/c alto y cubierta baja) y niveles de cloruro de altos a extremos (hasta 10 veces los niveles recomendados por ACI) en el refuerzo, han revelado consistentemente que el acero galvanizado tuvo mejores resultados que el acero negro, pudiendo hacer comparaciones de corrosión significativas. Por ejemplo, en 1991 se realizó una inspección a una cantidad de puentes en Iowa, Florida y Pensilvania para comparar el comportamiento del refuerzo galvanizado y sin recubrimiento en las cubiertas expuestas durante un año a condiciones marinas húmedas o sales descongelantes en invierno.

Esta inspección complementó inspecciones anteriores de 1974-6 y 1981 de muchos de los mismos puentes. Después de exposición por un periodo de 24 años se encontró que las barras galvanizadas habían sufrido solamente corrosión superficial en concreto sólido y sin grietas, incluso cuando los niveles de cloruro eran altos. A pesar que los niveles de cloruro habían subido desde la inspección en 1981, no se detectó ningún cambio importante en las barras galvanizadas, y el espesor promedio del zinc que quedaba en el refuerzo no había cambiado significativamente desde 1981, y aún así fue superior a lo requerido por ASTM A767 para materiales nuevos.

En 2002 se volvió a realizar en Pensilvania un estudio complementario sobre el comportamiento a largo plazo del acero galvanizado en cubiertas de puentes de concreto. Las inspecciones anteriores en los periodos 1974-1999 (mencionados anteriormente) habían examinado puentes en Florida, Iowa, Pensilvania y Vermont. Esta inspección fue sobre los puentes Athens y Tioga en Pensilvania, ambos con refuerzo galvanizado, que ya habían sido examinados antes en 1981 y 1991.

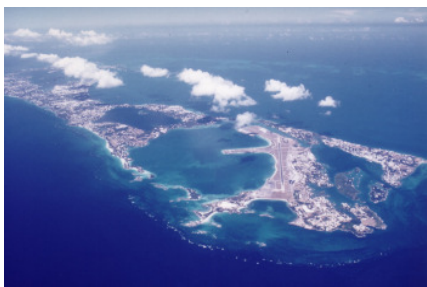
- **Puente Athens** (28 años). El nivel de cloruro promedio era 0.41% (por peso del cemento), que es más de 2.5 veces más alto que el valor límite de ACI para aceros negros. En áreas donde el potencial era bajo (alrededor de -700 mV), las barras galvanizadas no mostraron signos de corrosión. Exámenes metalográficos revelaron que la mayoría de barras excedieron el espesor mínimo del recubrimiento galvanizado requerido en barras nuevas de alrededor de 84 micrómetros.
- **Puente Tioga** (27 años). El nivel de cloruro promedio fue 0.40% (por peso del cemento), nuevamente más de 2.5 veces más alto que el valor límite de ACI. No había signos de corrosión sobre ningún refuerzo galvanizado, ni siquiera en áreas con alto potencial. El espesor del recubrimiento de zinc restante en las barras excedió en gran medida el espesor mínimo especificado de 84 micrómetros.

Los resultados generales de esta inspección confirmaron el comportamiento satisfactorio del refuerzo galvanizado en estas cubiertas de puentes después de exposición a largo plazo a cloruro de calcio, que se usó como un aditivo al momento del vaciado, y a sales descongelantes. El informe concluyó que las "barras con refuerzo galvanizado generalmente mostraron resistencia satisfactoria a la corrosión" y la inspección visual reveló "sin signos de corrosión en cualquier refuerzo de acero" excepto en un área del puente Athens. Además, "en general no se observó agrietamiento, delaminación y descascamiento o evidencia de corrosión activa".

Datos similares desde las Bermudas también han comprobado la durabilidad a largo plazo del concreto con refuerzo galvanizado en ambientes marinos. Poco después de la Segunda Guerra Mundial comenzaron a construir varios muelles, embarcaderos y otras infraestructuras, utilizando una mezcla de barras galvanizadas y de acero simple (ver Figura 20). Una inspección llevada a cabo en 1991 demostró que el galvanizado estaba dando protección anticorrosiva continua al refuerzo en niveles de cloruro superiores a los niveles límites de corrosión de acero simple.

El estudio complementario confirmó estos hallazgos y reveló que las barras galvanizadas mantenían un espesor de recubrimiento de zinc residual en una estructura de más de 42 años excediendo el requisito mínimo. Los exámenes en el núcleo del concreto de estas estructuras confirmaron las observaciones anteriormente indicadas, que los productos de corrosión de zinc habían emigrado a distancia considerable (300-500 micrones) fuera de la superficie del recubrimiento y dentro de la matriz de concreto adyacente sin efectos visibles en la masa de concreto. Los datos de campo de este tipo ofrecen pruebas prácticas sobre los efectos de migración de los productos de corrosión de zinc demostrados en experimentos de laboratorio (ver Figura 19).





a) Las islas Bermudas muestran condiciones agresivas de exposición marina.



b) El "The Royal Bermuda Yacht Club" (1968) con barra galvanizada seguía en excelentes condiciones.



c) El nuevo Puente Watford (1979), con refuerzo completamente galvanizado.



d) Los cimientos de la planta de generación de energía a partir de desperdicios Tynes Bay con refuerzo 100% galvanizado.

Figura 20. Estudio del caso Las Bermudas.

Estos estudios reflejan claramente que cuando se usa apropiadamente la barra galvanizada como material de refuerzo exclusivo puede ofrecer protección anticorrosiva mejorada, en comparación con el acero negro en condiciones equivalentes del concreto y la exposición. Lo que está claro es que en concreto de buena calidad que esta bien compactado, curado y de una cobertura adecuada, la barra galvanizada resiste largos periodos de tiempo y ofrece un método eficiente y rentable de protección contra la corrosión. Sin embargo, en concreto que no son de calidad, específicamente los de relación a/c altos y baja cobertura al refuerzo, la galvanización retrasará la aparición de corrosión del refuerzo inducido por cloruro, pero esto será de beneficio limitado.

## 8. Aplicaciones del Refuerzo Galvanizado (referido a los Capítulos 1,7 y 9)

Cuando se analizan los costos y las consecuencias de los daños por corrosión en una construcción de concreto reforzado, el sobrecosto de la galvanización es visto como una pequeña inversión en la protección contra la corrosión. Si bien el costo inicial de galvanización puede sumar hasta 50% del costo de refuerzo, dependiendo del país de origen, la disponibilidad y el acceso a las plantas de galvanización dentro del país, el costo por usar refuerzo galvanizado como un porcentaje del costo total de construcción siempre es significativamente menor a éste. Desde luego, el costo total depende de la naturaleza y la ubicación de la construcción, y la extensión en la que se utiliza la barra galvanizada en toda la estructura. Por ejemplo, pocas veces es necesaria la galvanización en núcleos estructurales o elementos internos de grandes estructuras de concreto reforzadas, como los edificios de gran altura o los componentes embebidos en profundidad como los grandes pilares y cimientos.

El análisis del costo general para la construcción de edificios revela que la galvanización del refuerzo aumenta el costo total del concreto reforzado tal como se coloca a aproximadamente 6-10%. El valor real variará dependiendo de muchos factores como el tipo de barra y el precio de galvanización, la cantidad de acero usado por metro cúbico de concreto vertido, y el costo unitario de la masa de concreto. El precio del concreto está compuesto por varios componentes principales entre ellos el suministro de concreto, el encofrado y el abastecimiento de acero, y la fijación de costos. En promedio, el costo del acero no sería mayor que alrededor del 25% del costo total del concreto como es colocado. Si se considera también que raras veces es necesario galvanizar todo el acero en la estructura, y que el costo del marco estructural y el revestimiento de un edificio normalmente representa sólo alrededor de 25-30% de los costos totales de construcción, el costo adicional por galvanización se reduce entre 1.5-3.0% del costo total de construcción. Sin embargo, al galvanizar solamente ciertos elementos vulnerables o críticos como por ejemplo, paneles de superficie, el costo adicional por galvanización se reduce aún más, quizás tan poco como 0.5-1.0%.

Por su puesto, estos porcentajes solo se refieren a los costos totales de construcción y cuando se juntan con los costos totales del proyecto o los precios de venta finales, el costo agregado por galvanización se vuelve realmente más pequeño, a menudo menos de 0.2%. Éste representa una fracción muy pequeña del costo de reparaciones que se deben hacer por corrosión del refuerzo de acero sin protección. Se han reportado análisis de costos similares en varias ocasiones.

## 9. Aplicaciones del Refuerzo Galvanizado (referido a los Capítulos 1, 7)

Barras de acero galvanizado y otros aditamentos como pernos, ataduras, sujetadores, barras de trabazón y tuberías, han sido ampliamente utilizadas en una variedad de estructuras y elementos de concreto reforzado. La razón de esto se basa en la filosofía de que el recubrimiento proporciona una garantía contra la temprana o inesperada corrosión del refuerzo. Si estos daños ocurren, es probable que se necesiten hacer reparaciones y correcciones costosas en la estructura con el fin de desarrollar el diseño completo de la vida en servicio de la misma. Esto representa una carga económica cada vez más creciente y la reorientación de recursos escasos.

Las circunstancias particulares en que es probable que la galvanización del refuerzo sea una decisión de ingeniería sensata y rentable son:

- elementos livianos, recubiertos y prevaciados, y características de edificación arquitectónica;
- vigas, columnas y placas expuestas a la superficie;
- unidades de edificación prefabricadas como los módulos de cocina y baño y construcción inclinada;

- elementos sumergidos o enterrados sujetos a efectos de aguas subterráneas y variaciones de la marea;
- estructuras costeras y marinas;
- infraestructura de transporte como cubiertas de puentes, caminos y barreras de seguridad (o guarda vías); y
- estructuras de alto riesgo en ambientes agresivos.

Existen muchos ejemplos en el mundo donde se ha utilizado exitosamente el refuerzo galvanizado en diversos tipos de construcciones de concreto reforzado, estructuras y construcciones en general, como los siguientes:

- cubiertas de puentes de concreto reforzado y aceras;
- torres de enfriamiento y chimeneas;
- almacenamiento de combustibles de carbón;
- revestimiento de túneles, tanques de almacenamiento de agua e instalaciones;
- muelles, embarcaderos y plataformas marinas;
- puertos deportivos, pontones flotantes y amarraderos;
- diques de defensa y balaustradas costeras;
- fábricas de papel, obras de tratamiento de agua y desagüe;
- instalaciones de procesamiento y plantas químicas;
- aditamentos de carreteras y barreras de seguridad, y también
- postes de luz y postes de energía.

En estos años se han publicado varios artículos con respecto al uso del refuerzo de acero galvanizado en muchas de estas aplicaciones. Asimismo, se han publicado algunas experiencias generales con refuerzo galvanizado por inmersión en caliente, principalmente desde una perspectiva europea. Además, la Asociación Americana de Galvanizadores ha publicado una lista detallada de estructuras con refuerzo galvanizado con miles de entradas que incluyen edificaciones, infraestructura de transporte y planta química y de tratamiento. Recientemente se han publicado artículos más detallados sobre el uso del refuerzo galvanizado específicamente en construcciones de puentes en carreteras y construcciones marinas para la industria petrolera y de gas en los Países Bajos.

En la Tabla 5 se dan algunos ejemplos resaltantes, muchos de ellos sobre edificaciones famosas e importantes estructuras en el mundo. Se dan otros ejemplos sobre construcción en general, edificios, puentes y carreteras, así como estructuras costeras y marinas en las Figuras 21-24.

Finalmente, vale la pena destacar que en el Informe sobre Estado del Arte de Recubrimiento de Protección del Refuerzo (Comité Euro-Internacional du Béton, 1992) se indicaron los siguientes beneficios de uso práctico del refuerzo galvanizado:

- los procedimientos de galvanización apropiados no tienen efectos significativos en las propiedades mecánicas del refuerzo de acero;
- para el mejor comportamiento, el refuerzo galvanizado debe ser pasivado mediante el tratamiento de cromatizado;
- el recubrimiento de zinc proporciona protección catódica local al acero, siempre que no se haya consumido el recubrimiento;
- el refuerzo galvanizado proporciona protección al acero durante el almacenamiento y la construcción antes de colocar el concreto;
- la corrosión de acero galvanizado en concreto es menos intenso y menos extenso durante un periodo de tiempo sustancial que la de acero negro;

- el acero galvanizado en concreto tolera concentraciones de cloruro más altas que el acero negro antes que se inicie la corrosión;

Tabla 5.- Ejemplos de estructuras importantes que utilizan refuerzo de acero galvanizado.

Ópera de Sydney: paneles de 35 mm. de espesor para revestimiento de veleros y murallones de defensa	Comisión Hidroeléctrica, Hobart: revestido con 950 paneles galvanizados prevaciados
Parlamento de Nueva Zelanda, Wellington: revestido con paneles de imposta prevaciados	Exhibición de Intercambio de Telecomunicaciones, Melbourne: revestido con paneles prevaciados
Banco de Hawaii, Waikiki: arcos delgados, decorativos y prevaciados, con barra galvanizada	Hotel Intercontinental, Sydney: 1549 ventanas prevaciadas y unidades de imposta
Teatro Nacional, Londres: más de 1000t de barras galvanizadas en paredes de parapeto expuestas	ANDOC North Sea Oil Rig: 2000t de barras galvanizadas en el techo del tanque de almacenamiento
Edificio Crocker, San Francisco: elementos estructurales con refuerzo galvanizado	Eastbourne Congress Theatre, Reino Unido: paneles con revestimiento y parteluces
Edificio de Colegiata, University College, Londres: barra y malla galvanizada	University Sports Hall, Birmingham: paneles de 37 mm de espesor que utilizan barra galvanizada
New Hall, Cambridge University: malla galvanizada en segmentos de techo	Library Tower, Sydney: barra galvanizada en paneles y columnas exteriores
Staten Island Community College, New York: paneles blancos brillantes y prevaciados	Corte Superior y Galería Nacional, Canberra: barra galvanizada en áreas críticas
New Parliament House, Canberra: 1800 paneles con revestimiento galvanizado	Banco Barclays, Ciudad de Londres: ventana galvanizada prevaciada alrededor
Oficinas, Puente Westminster, Londres: paneles frontales blancos con refuerzo galvanizado	Centro Nacional de Tenis, Melbourne: estadio con vigas de soporte prevaciadas
Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano, Washington, DC	University of Wisconsin: paneles prevaciados y concreto in-situ en numerosos edificios
Plaza Financiera del Pacífico, Honolulu: paneles con revestimiento prevaciados	Levi Strauss Building, California: paneles prevaciados
Wrigley Field Sports Arena, Illinois: paneles prevaciados en cubiertas de asiento	Georgetown University Law Centre: Paneles prevaciados
Frontier Chemical Company, Estados Unidos: zapata con refuerzo galvanizado para losas de piso	US Coast Guard Barracks, Elizabeth City, NC: barra galvanizada en 237 paneles prevaciados
Cubierta de puente y construcción de carreteras en New York, New Jersey, Florida, Iowa, Michigan, Minnesota, Vermont, Pensilvania, Connecticut, Massachusetts, Ontario y Quebec	John F. Kennedy Parking Garage, Detroit: acero con refuerzo galvanizado para protección contra la oxidación de la subsuperficie
IBM, Sede de la División de Procesamiento de Datos, White Plains, NY: Refuerzo galvanizado por inmersión en caliente en paneles frontales prevaciados	Football Hall of Fame Stadium, Canton, OH: acero con refuerzo galvanizado
Coke quenching towers, Dunkirk, Francia: Refuerzo estructural galvanizado	Cúpula del Templo, Roma, Italia: Refuerzo galvanizado
Centro Cívico de Arkansas: Refuerzo galvanizado en columnas externas delgadas	Conductos de agua de enfriamiento mediante estación de energía, Spijkm Países Bajos: Refuerzo completamente galvanizado
Embarcaderos marinos en Ominichi, Japón y Riva di Traiano, Roma, Italia: todo con refuerzo galvanizado	Toutry Viaduct, St. Nazaire Bridge y Pont d'Ouche Viaduct, Francia: barras de refuerzo galvanizado

- se pueden usar concretos livianos y porosos con la misma cobertura que para concretos normales;
- el refuerzo galvanizado retrasa la aparición de grietas, y es menos probable que se produzca descascamiento del concreto.
- el concreto puede ser utilizado en ambientes más agresivos. Por lo tanto, una norma de diseño de los componentes del concreto pueden ser retenidos por diversas condiciones de exposición mediante el uso de acero galvanizado en la mayoría de los casos de agresividad.
- se obtiene mayor compatibilidad con cemento de bajo contenido de álcali;
- se puede tolerar fácilmente el trabajo deficiente que origina calidad variable del concreto (compactación deficiente, relación agua/cemento alta);
- la cobertura reducida accidentalmente es menos peligrosa que con el acero negro;
- se puede tolerar contacto continuo inesperado entre el concreto y el agua retenida;
- la reparación de estructuras dañadas se puede retrasar por más tiempo que con el acero negro;
- se aceptan equipos galvanizados en la superficie del concreto, ya que son para las uniones entre los paneles prefabricados;
- el uso de refuerzo galvanizado asegura una apariencia limpia del concreto acabado sin problemas de que puedan aparecer grietas, ya sea por descascamiento o por manchado de óxidos, y
- el refuerzo galvanizado es más limpio y más fácil de trabajar, y hace posible considerar el uso de alambres más delgados como tejidos soldados.

El informe continúa diciendo que **“es importante recordar que aún cuando se han alcanzado estos beneficios, el uso de refuerzo galvanizado no se deberá considerar como una alternativa a las disposiciones de una adecuada cobertura de concreto denso e impermeable, a menos que se cumpla con los criterios especiales de diseño. La galvanización del refuerzo es una medida complementaria de protección contra la corrosión – una forma de seguridad en caso que el concreto no pueda aislar y proteger al acero.”**

## 10. Comentarios Finales

Durante muchos años (de hecho aproximadamente 60 años), la galvanización del refuerzo del acero ha demostrado proporcionar medios rentables y fiables de protección contra la corrosión en el concreto en diversas condiciones de exposición. Evidentemente, la galvanización sólo es uno de los varios sistemas de protección que se pueden usar en el concreto reforzado. Sin embargo, la conveniencia de fabricación y suministro del producto, la facilidad de manipulación el transporte e instalación, y el hecho de que no se necesitan requisitos especiales de diseño, ha significado que se haya aceptado en muchos países para una gran variedad de construcciones de concreto.

En los últimos 15 a 20 años especialmente se han realizado innumerables exploraciones e investigaciones de campo sobre las características y los resultados del refuerzo galvanizado. Este considerable grupo de trabajo ha enfatizado repetidas veces los beneficios de la galvanización al retrasar la aparición de la corrosión en el concreto reforzado y al reducir los riesgos de agrietamiento y manchas de óxidos de la masa de concreto. El umbral más alto de cloruro en zinc comparado con el acero, y que el zinc en el concreto casi no es afectado por la carbonatación, ofrece al refuerzo galvanizado con una resistencia a la corrosión inherente por encima de la barra de acero convencional.

La presencia del recubrimiento mismo extiende el tiempo de servicio de la barra galvanizada debido al retraso durante el cual ocurre la disolución del recubrimiento.

Al igual que todos los sistemas de protección contra la corrosión, existe un costo asociación con la galvanización. Aunque el costo por refuerzo galvanizado puede aumentar a aproximadamente 50%, cuando se considera junto con los costos totales de edificación y construcción, y los altos costos potenciales asociados a la reparación prematura del concreto dañado, el recargo que se paga por el refuerzo galvanizado es muy bajo. Incluso si se puede evitar un ciclo de reparaciones locales sobre una estructura de concreto grande, el costo por galvanización podría ser más de lo acordado. Aunque, la razón principal para usar algún sistema de protección contra la corrosión es extender la vida útil de la estructura. La experiencia con la galvanización ha demostrado que se puede lograr con facilidad muchos tipos de estructuras de concreto reforzado y elementos en condiciones de exposición leve, moderada y severa.

Sin embargo, es importante recordar sobretodo que cuando se usa refuerzo galvanizado (al igual que con cualquier sistema de protección para concreto), el concreto está diseñado y colocado correctamente y es apropiado para el tipo de elemento y las condiciones de exposición. A menos que se apliquen requisitos de diseño específicos, como cubierta reducida o construcción ultra liviana, se debe diseñar y colocar el concreto como si se va usar el refuerzo de acero convencional. En esencia, no se deberá usar la galvanización a expensas de la calidad básica y la integridad del concreto. De este modo, se puede considerar que la galvanización proporciona protección contra dichas circunstancias, que podrían conducir a la corrosión prematura del refuerzo convencional y el deterioro de la masa de concreto.

## 11. Lecturas Adicionales ([www.galvanizedrebar.com](http://www.galvanizedrebar.com))

- Asociación Americana de Galvanizadores (AGA), Guía de Manejo en Campo: Galvanización por Inmersión en Caliente versus Pinturas epoxi cas adheridas por fusión, 2000, Englewood, CO, Estados Unidos.
- Asociación Americana de Galvanizadores, Galvanización por Inmersión en Caliente para prevenir la corrosión: Una guía para especificar e inspeccionar el refuerzo de acero galvanizado por inmersión en caliente, AGA, Centennial, CO, Estados Unidos, 2002, 20 páginas
- Bentur N, Diamond S and Berke NS, *Corrosión del Acero en Concreto*, E & FN Spon, Chapman and Hall, Londres, 1997.
- Broomfield JP, *Corrosión del Acero en Concreto*, E & FN Spon, Chapman and Hall, Londres, 1997.
- Instituto de Concreto de Australia, Uso de Refuerzo Galvanizado en Concreto, Práctica Actual Nota 17, 2002, Instituto de Concreto de Australia, Sydney.
- Comité Euro-Internacional du Béton, Protección del Recubrimiento para el Refuerzo: Informe de Novedades, Thomas Telford Services Ltd, 1995, 51 páginas.
- Asociación de Galvanizadores de Australia, Galvanización por Inmersión en Caliente después de la fabricación, Melbourne, VIC, Australia, Julio 1999, 72 páginas.
- Asociación Internacional del Zinc, Refuerzo Acero Galvanizado por Inmersión en Caliente – Invertir en Concreto, IZA, Bruselas, 2006, 16 páginas.
- Yeomans SR (Editor), *Refuerzo de Acero Galvanizado en Concreto*, Elsevier UK, Diciembre 2004, ISBN 008044511X, 320 páginas.

Con formato: Justificado





Pared Reforzada, Long Bay, NSW



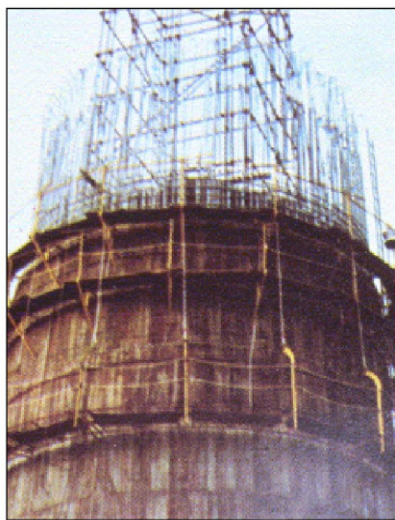
Abertura de Acceso



Fábrica de Acero - Almacenamiento del  
horno de Coque



Túnel Ferroviario, Melbourne



Chimenea



Sundial - Singleton, NSW

Figura 21. Concreto con reforzamiento galvanizado en construcción general





Courthouse, Townsville, Queensland



Parlamento, Australia



100 William Street, Sidney



Torre ASER, Adelaide



Paneles Pre-fabricados



Vigas de pared de relleno

**Figura 22. Concreto con reforzamiento galvanizado en construcciones**



Tablero de Puente, USA



Barrera de seguridad, autoruta



Pavimento, USA



Pista elevada – USA



Construcción de puente – USA



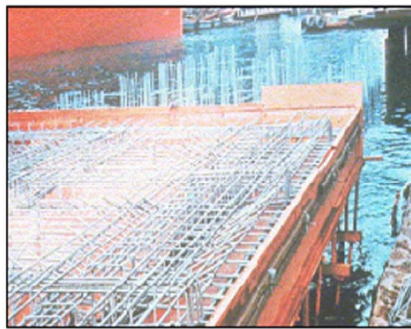
Valla de seguridad, Canadá

**Figura 23. Concreto con reforzamiento galvanizado en puentes y carreteras**





Marinas flotantes, Australia



Muelle Ominichi, Japón



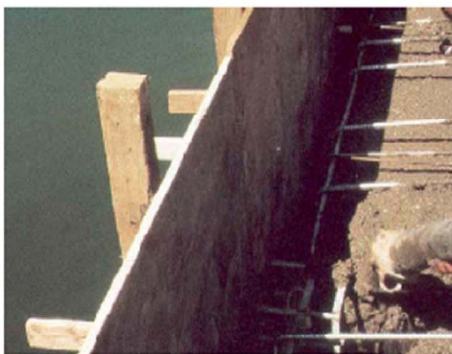
Tuneles de desembocadura - Australia



Plataforma Petrolera ANDOC - Mar del Norte



Canales de enfriamiento - Holanda



Pared de contención - Australia

**Figua 24. Concreto con reforzamiento galvanizado en ambientes marinos y costeros**