

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

La Corrosión del Concreto en construcciones portuarias, subestaciones portuarias y otros ambientes, Un enfoque para Colombia **Juan Diego Montoya Serra¹**

Abstract

The geographic position of Colombia in the tropic, makes the country especially vulnerable to the corrosion. The extension of its 2900 km of coasts where the great harbor and oil infrastructure of the country is concentrated is mainly affected by chlorides and carbonates, in conditions of humidity and temperatures that affect the performance of the steel of reinforcement for concrete. Actually, Colombia is in process of Internationalization that brings a development and growth of the infrastructure of its ports; for that reason it is important to know the economic implications of the corrosion that generates lost of capital, energy, products, equipment and risks of industrial security and to know the alternatives necessities to prevent it. When good practices in the reinforcement of the concrete one are not used and there are presences of oxygen and water, relative humidity between 70-80% and marine tropical climate, the corrosion is generated. The Hot Dip Galvanize process offers protection to the steel in the concrete by: Passivation of zinc with the fresh cement, and by means of barrier and cathodic Protection.

Resumen

La posición geográfica de Colombia en el trópico, la hace especialmente vulnerable a la corrosión. La extensión de sus 2900 km de costas donde se concentra la gran infraestructura portuaria y petrolera del país, es principalmente afectada por cloruros y carbonatos, en condiciones de humedad y temperaturas que afectan el desempeño del acero de refuerzo para concreto. Actualmente Colombia se encuentra en un proceso de Internacionalización que trae un desarrollo y crecimiento de la infraestructura de sus puertos. Por esta razón es importante conocer las implicaciones económicas de los problemas de corrosión que generan pérdida de capital, energía, productos, equipos y riesgos de seguridad industrial y conocer las alternativas necesarias para prevenirla. Cuando no se utilizan buenas prácticas en el refuerzo del concreto y se tiene presencia de oxígeno y agua, humedad relativa entre 70-80% y clima tropical marino, se genera la corrosión. El Galvanizado por inmersión en Caliente brinda protección al acero en el concreto por Pasivación del zinc con el cemento fresco y protección por barrera y Protección catódica.

Palabras-clave: Acero de Refuerzo de Concreto, Corrosión por Cloruros y Carbonatación, Pasivación del Zinc, Protección catódica, Protección tipo barrera.

¹Ingeniero de Producción – Asociación Latinoamericana del Zinc LATIZA

Introducción

La posición geográfica de Colombia en el trópico, en donde abundan gran variedad de climas y se presentan grandes variaciones de humedad relativa y temperaturas, la hacen especialmente vulnerable a la corrosión.

Se explicará entonces en el presente trabajo, que existe una alternativa para prevenir los problemas de corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de las instalaciones portuarias de las costas colombianas.

Se hará énfasis en la importancia que tiene el cumplimiento de las especificaciones de diseño (adecuado espesor), la calidad de la masa de concreto (concreto denso e impermeable) y las buenas prácticas que se deben manejar en las obras, para alcanzar el mejor desempeño de las estructuras. Esto quiere decir que el galvanizado no debe ser sustituto para concreto de baja calidad o para suplir malas prácticas: con la mejor calidad del concreto disponible, se alcanzará el mejor desempeño.

Se explicarán además las condiciones que potencializan la corrosión cuando son utilizadas las malas prácticas en presencia de oxígeno y agua, las diferencias de potencial electroquímico, el pH, la temperatura y la humedad relativa entre otros factores.

Como solución a esta problemática, se presenta que el acero galvanizado en caliente, brinda una protección superior debido a sus características y al tipo de protección: Protección de barrera a la barra, protección de sacrificio al acero expuesto, tolerancia al cloruro más alta que el acero negro y resistencia a la reducción del pH del Concreto.

La durabilidad del refuerzo es entonces 3 veces mayor que la del acero negro, es decir, la corrosión del acero negro comenzará después de 15 años y para el refuerzo galvanizado, el ataque comenzará luego de 44 años, según los estudios realizados.

Finalmente se explicarán los criterios de ingeniería para el refuerzo galvanizado en concreto como lo son: propiedades mecánicas, adherencia del refuerzo galvanizado en el concreto, criterios para dobleces, estrategias para soldadura, reparación del recubrimiento, transporte y almacenamiento y técnicas de manejo en campo. Algo muy importante es que el refuerzo galvanizado puede ser considerado como reemplazo directo para el tradicional acero negro en todos los diseños de concreto reforzado y en la construcción.

Revisión bibliográfica / Resultados / Discusión

1. Sistema Portuario Colombiano

El actual sistema portuario comprende 122 instalaciones, de las cuales 5 corresponden a Sociedades Portuarias Regionales, 9 a Sociedades Portuarias de Servicio Público, 7 a Sociedades Portuarias Privadas de Servicio Privado, 44 a Muelles Homologados, 10 a embarcaderos o muelles de cabotaje para naves menores y 47 a otras facilidades portuarias.

En Colombia, son relativamente recientes los estudios que se han comenzado a realizar en el sentido de los costos asociados a la corrosión, lo que da lugar a estimar el beneficio económico al aplicar políticas de control. Se estima que el costo por corrosión en Colombia puede estar alrededor de un 2.3% de su PIB (Producto Interno Bruto). (1), (5).



Ilustración 1: Ubicación de los principales puertos de Colombia

2. Panorama de la infraestructura:

Colombia se encuentra actualmente en un proceso de Internacionalización económica y reconversión industrial, que se encuentra plasmado en los diferentes proyectos de infraestructura que deben llevarse a cabo en los próximos años según los datos del Departamento Nacional de Planeación DNP, el Ministerio de Transporte y el Instituto Nacional de Concesiones INCO. (2)

Dentro del marco de este desarrollo, en la costa Atlántica se proyecta la construcción de varios puertos como lo son: Puerto Nuevo, Puerto Brisa y Puerto Bahía.



Ilustración 2 Panorámica del Puerto de Santa Marta

En la Sociedad Portuaria Regional de Santa Marta se harán inversiones para atender el turismo y el carbón. En la costa Pacífica se ejecutan el de Aguadulce y la Terminal de Contenedores de Buenaventura. Las sociedades portuarias regionales harán inyecciones de capital por US\$844 millones. El puerto de la capital de Bolívar está ejecutando el Plan Maestro de Desarrollo, que involucra también el puerto de Contecar, en el cual se invertirán recursos por US\$156 millones, de acuerdo con el Instituto Nacional de Concesiones, Inco.

Todo este panorama hace evidente la necesidad de abordar las implicaciones económicas de los problemas de corrosión de una manera integral, con los diferentes actores encargados de llevar a cabo y de ejecutar cada uno de los proyectos y de pensar en políticas para la adopción de medidas y controles que minimicen el impacto económico que se pueda generar.

Para esto es necesario crear cultura entre los diseñadores, consultores y también en las entidades que especifican el diseño de todo este tipo de infraestructura, no solo en la infraestructura portuaria, sino también en subestaciones petroleras, industria minera, agropecuaria, eléctrica y de la construcción en general, que se ve afectada directamente por los cloruros y carbonatos.

La corrosión afecta a la totalidad de agentes del proceso económico, bien sean productores o consumidores; A causa de ella se desperdician capital, energía y otros recursos, en problemas como pérdidas de productos por fallas, deterioro o contaminación,

Mantenimiento y reparación de equipos, capacidad de planta en exceso, reemplazo de equipos y edificaciones y riesgos de seguridad industrial, incluso pérdida de vidas humanas.

3. El ambiente marino en Colombia:

El agua de mar contiene sales disueltas que resultan agresivas para el concreto como lo son Cloruro de Sodio (NaCl), Cloruro de Magnesio (MgCl₂), Sulfato de Magnesio (Mg SO₄), Sulfato de Calcio (CaSO₄), Cloruro de Potasio (KCl) y Sulfato de Potasio (K₂SO₄).

Como se sabe, la corrosión en el concreto es asociada con la temperatura y la humedad: El incremento de la temperatura potencializa cualquier reacción química: un aumento de 10°C duplica la velocidad de las reacciones. Para el caso de la humedad relativa, la corrosión por carbonatación se activa en un rango que varía entre el 60% y el 90% de humedad relativa, mientras que para el caso de la corrosión por cloruros esta se activa en un rango entre el 70% y el 90%.

Se concluye entonces que las regiones costeras son potencialmente sensibles a este fenómeno y que en Colombia no es la excepción por todas las condiciones “ideales” para la propagación de la corrosión.(3)

A continuación se presentan algunas fotografías que evidencian el estado de algunos sitios en particular que se han visto afectado por este fenómeno.



Ilustración 3: Estructura de puente en Coveñas, Colombia.



Ilustración 4: Poste de Transmisión de Energía en Cartagena, Colombia

A continuación se presenta una sinopsis del fenómeno de la corrosión en el acero de refuerzo en estructuras de concreto, en donde se analizan las causas, tratamiento y recomendaciones para prolongar la vida útil de la infraestructura en sitios tan propensos como son las costas de los países del trópico como lo es Colombia.

4. Protección del acero embebido en el Concreto

El acero embebido en el concreto está protegido contra la corrosión debido a la **pasivación** que se logra cuando algunos productos se adhieren a la superficie del acero y lo aíslan de su ambiente adyacente.

Esta película protectora se forma en el medio altamente alcalino del cemento hidratado (con $\text{pH} > 12.5$), 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, generando la iniciación de la corrosión.

El otro factor que permite la protección del acero es por medio de la **barrera** proporcionada por el concreto, es decir, el espesor de concreto para mantener el estado pasivo en los alrededores del acero. La durabilidad e integridad del concreto reforzado en la construcción son proporcionadas, en gran parte por la calidad de la masa de concreto. En esencia se requiere de un adecuado espesor (dependiendo de la agresividad del ambiente de trabajo) y de un concreto denso e impermeable (de resistencia mecánica apropiada) para mantener las condiciones protectoras adecuadas necesarias para asegurar que el acero no se corra.

4.1 La masa de concreto

Para mantener las condiciones de pasividad en la posición del acero embebido se requiere de un diseño estructural apropiado (normatividad), de concreto de buena calidad estructural (materiales y mezclas) y de buenas prácticas (mano de obra calificada).

4.2 La calidad del concreto:

De igual manera se deben tener en cuenta todos los aspectos relacionados con:

Diseño estructural y especificaciones
Materiales del concreto y proporciones de mezcla.
Supervisión de la mano de obra.
Recubrimiento para el refuerzo
Materiales – tipo de cemento, agregados, etc.
Diseño de mezcla – a/c, cemento, aditivos.
Colocación, compactación y curado.

Se presenta que a mayor relación agua/cemento, aumenta la trabajabilidad (facilidad de colocación) pero aumenta la permeabilidad (acceso de humedad) y disminuye la resistencia mecánica. (4).

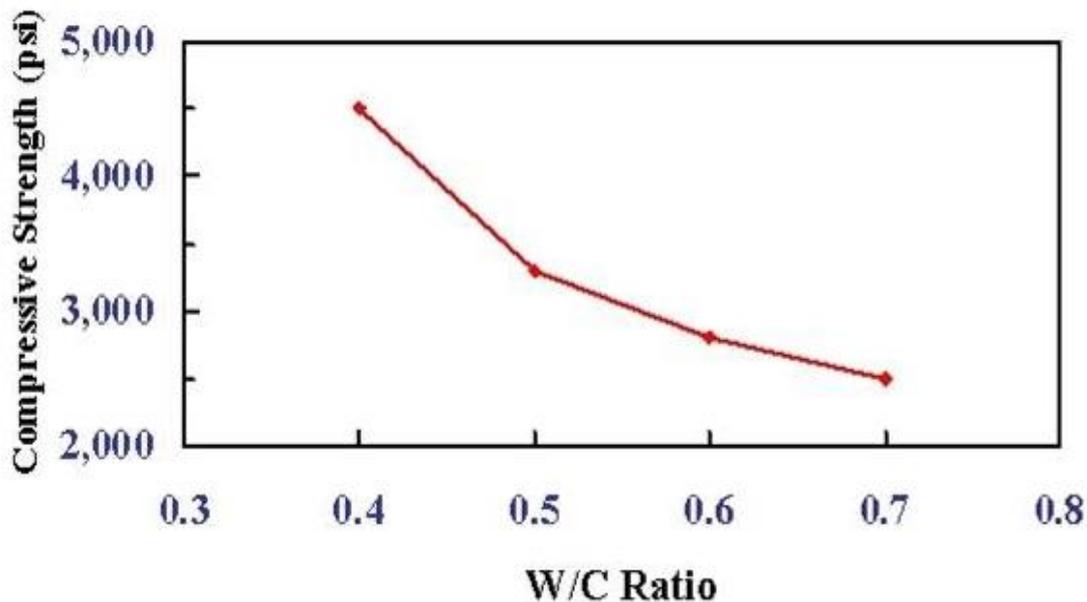


Ilustración 5: Relación Agua Cemento vs Resistencia Mecánica

4.3 La importancia de las buenas prácticas en la obra:

A continuación se ilustran las prácticas que se deben tener en cuenta para garantizar la buena calidad del concreto de refuerzo:



Ilustración 6: Posicionamiento del Refuerzo



Ilustración 7: Colado del Concreto



Ilustración 8: Buena Compactación



Ilustración 9: Curado Suficiente y Apropiado

5. La Corrosión del Acero de Refuerzo

La corrosión del acero de refuerzo comienza cuando el pH del concreto es reducido por debajo de alrededor de 11.5 y el acero es despasivado por cloruros y una vez haya comenzado el ataque se presentan las siguientes situaciones:

- Productos de corrosión expansiva causan esfuerzos de ruptura por tensión ($>3-4$ MPa)
- Ocurre agrietamiento (esquinas, bordes)
- Aparecen manchas de óxido en superficies exteriores
- Desprendimiento de la cubierta de concreto.

A continuación se describe el esquema de la corrosión del acero de refuerzo:

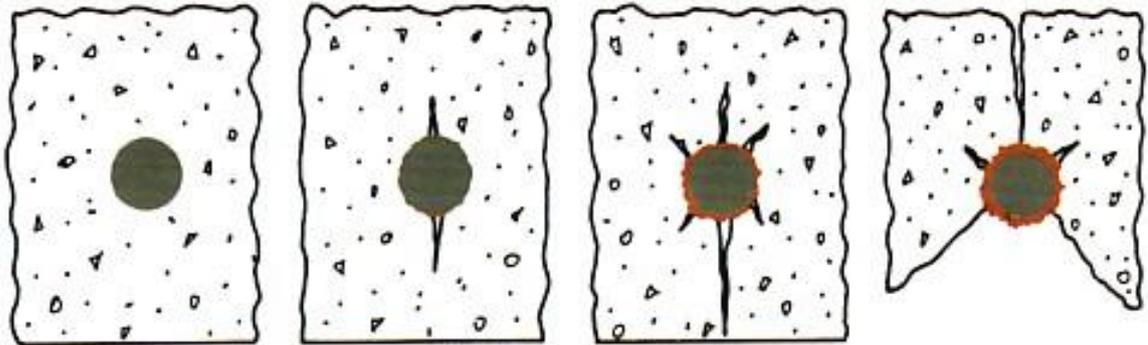


Ilustración 10: Esquema de corrosión del acero de refuerzo

- | | | | |
|--------------------------|---|--|---|
| a) Antes de
corrosión | b) Corrosión activa
(formación de
Productos expansivos) | c) Mas Corrosión
(grietas y manchado) | d) Ruptura y delaminación del
concreto, acero expuesto |
|--------------------------|---|--|---|



Ilustración 11: Ejemplo de acero expuesto

Condiciones generales para que se produzca la corrosión:

La presencia de oxígeno y agua:

- La Humedad Relativa óptima es de 70-80%
- En clima tropical marino: HR > 80%

Diferencias en el potencial electroquímico debido a:

- Variaciones en el recubrimiento de concreto
- Disponibilidad de agua y oxígeno
- La condición de la superficie del concreto, y
- Distintos contactos metálicos (par galvánico).

Tabla 1; Requisitos para la corrosión del acero

pH < 11.5	pH > 11.5
ACERO	ACERO
OXÍGENO	OXÍGENO
AGUA	AGUA
	CLORURO

La corrosión inicia cuando el acero es despasivado, es decir, pierde la protección de la superficie.

Esto puede ser causado por la reducción del pH de la cubierta de concreto (el proceso de carbonatación) y/o la presencia de cloruros sobre la superficie del refuerzo en concentraciones mayores al nivel umbral. (4)

Carbonatación del concreto:

Es la pérdida de alcalinidad por reacción con CO_2 disuelto en agua – efecto de lluvia ácida:

- Una reacción de neutralización química entre un álcali fuerte y un ácido (carbónico) débil;
- Produce precipitados de carbonatos insolubles;
- La rapidez de la reacción disminuye con la profundidad desde la superficie – el perfil de pH;
- Profundidad de carbonatación depende de la permeabilidad y grietas cavidades poros, etc.;
- Mayor efecto con SO_2 y NO_2 .

Ataque por Cloruros del Acero:

Los cloruros causan despasivación del acero debido a rotura de la película protectora sobre la superficie, aún a altos valores de pH, lo cual causa corrosión.

Cloruros ingresan al concreto vía:

- Agregados contaminados, arenas marinas, aditivos.
- Agua salobre o salada de usada para mezcla o curado.
- Exposición en ambientes marinos y/o costeros.
- Uso de sales de deshielo.

Es de importancia anotar que el Cloruro no causa corrosión en estructuras sumergidas permanentemente en agua de mar (debido a la falta de oxígeno) y que la corrosión por cloruros es más seria en zonas expuestas a los ciclos de inmersión y secado (zona de rompeolas y aerosol).

6. Cómo evitar la corrosión en el concreto reforzado:

Como se mencionó arriba, la manera más efectiva y rentable para minimizar el riesgo por corrosión en el concreto reforzado es asegurar que el concreto tenga 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 se han 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.

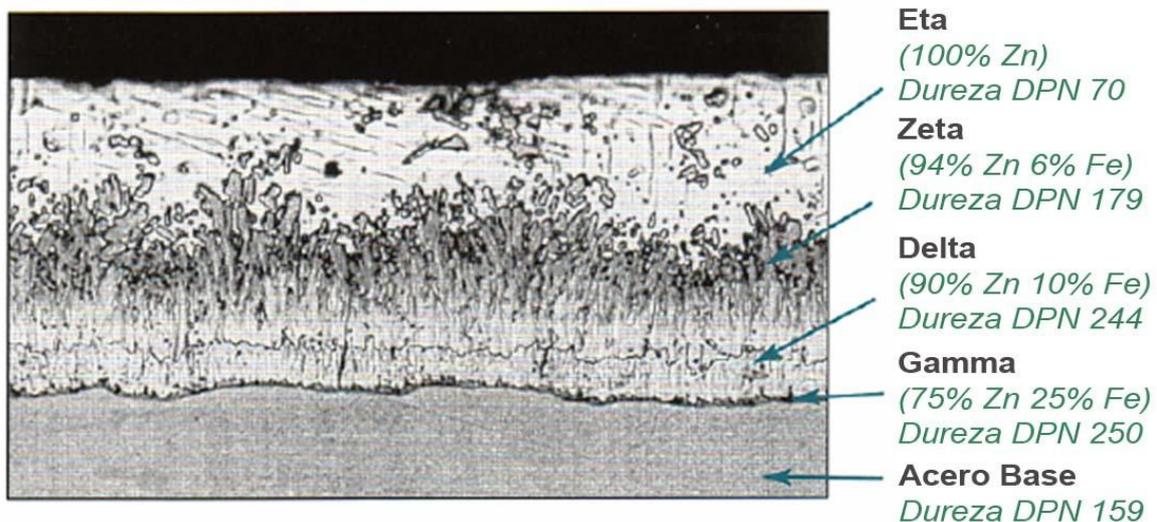
Para mitigar estos efectos, se presentan una serie de alternativas:

- 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.

Para efectos del presente trabajo, se presentará en detalle la galvanización del acero de refuerzo como una de las alternativas más eficaces para su protección.

7. Introducción al Galvanizado por Inmersión en Caliente, HDG (Hot Dip Galvanizing):

El galvanizado en Caliente es el más común de los métodos de recubrimiento para secciones estructurales, incluyendo la barra de refuerzo. 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. (6)

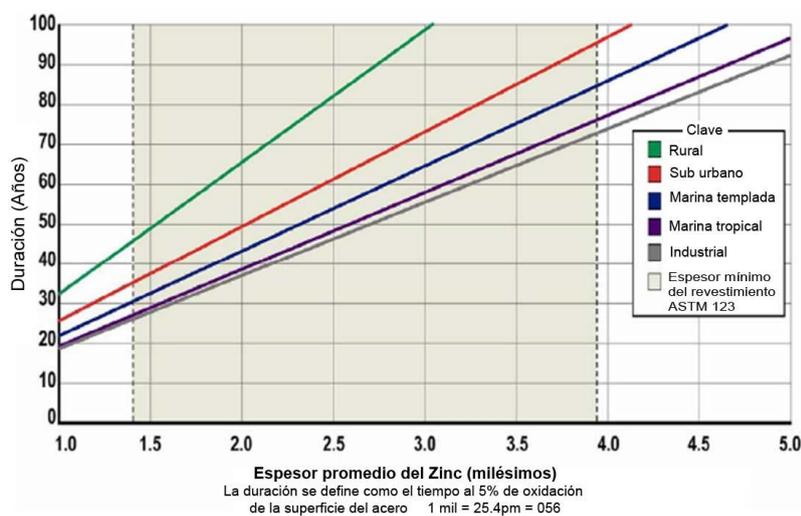


El recubrimiento de zinc proporciona: Protección de barrera para la barra, protección de sacrificio al acero expuesto, tolerancia mayor a los cloruros que el acero negro y resistencia a la reducción del pH del concreto.

Además permite aplicaciones diversas en un amplio rango de estructuras y condiciones de exposición.

7.1 Vida útil Recubrimientos Galvanizados

El tiempo de vida en servicio de cualquier Recubrimiento Galvanizado depende principalmente del espesor del recubrimiento y la severidad de las condiciones de exposición.



Es de anotar que la figura anterior, hace relación hasta que la corrosión ha alcanzado el 5% de la superficie galvanizada para aceros galvanizados y expuestos al medio ambiente, por lo que no se espera el mismo desempeño para el caso del acero de refuerzo galvanizado.(6)

Para el caso de los refuerzos galvanizados, se ha encontrado mediante varias investigaciones que la vida de servicio de estos depende de varios factores como lo son:

- Naturaleza y calidad del concreto – igual que para el acero negro.
- La severidad de las condiciones de exposición – igual que para el acero negro; y
- Las características metalúrgicas del recubrimiento de zinc – único al galvanizar.

La norma que especifica el uso de las barras o varillas para concreto es la ASTM A767 la cual se resume en la siguiente tabla dependiendo de la clase o tipo de barra y los espesores mínimos requeridos.

Norma ASTM A767 Zinc-coated (galvanized) steel bars for concrete reinforcement

Class I	BARRA # 3	915 g/m²	130 µm
	BARRA # 4 Y MAYORES	1070 g/m²	153 µm
Class II	BARRA # 3 Y MAYORES	610 g/m²	86 µm

El Galvanizado proporciona protección multi-variada al acero en el concreto de la siguiente manera: por pasivación inicial del zinc al contacto con el cemento fresco, por protección tipo barrera y por protección catódica, en caso de que el acero subyacente quede expuesto.

El resultado es desempeño de largo término en un amplio rango de aplicaciones en la construcción y condiciones de exposición

7.2 Pasivación del zinc en el concreto:

La reacción inicia inmediatamente al contacto con la solución húmeda de cemento y en soluciones alcalinas fuertes > pH 12.5 el Zinc es pasivado por formación de capas de cristales adherentes - hidroxizincatos de calcio (CaHZn); El resultado es que la película superficial estabiliza al zinc, aislándolo del ambiente circundante.

El galvanizado proporciona resistencia completa al efecto de la carbonatación del concreto y consecuente disminución del pH de la cubierta de concreto, resistencia significativamente a los efectos de la corrosión inducida por cloruros y un incremento en la vida de servicio de al menos 4-5 veces.

Ventajas sobre el acero negro:

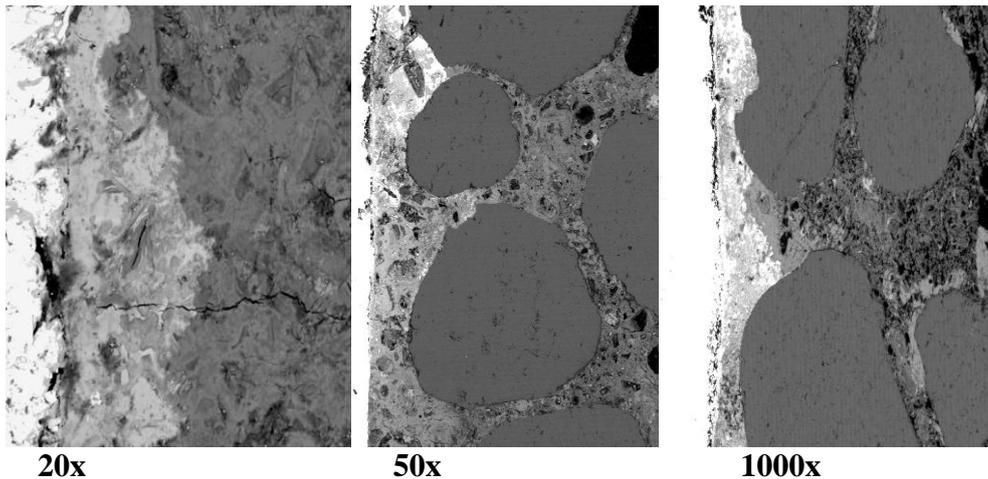
Se presenta entonces una gran **resistencia a la carbonatación** debido a su alta estabilidad en rangos de pH que varían entre 5 y 12.5 ya que el refuerzo galvanizado no es afectado por la reducción en el pH de la cubierta de concreto debido a los efectos naturales de la carbonatación.

También se presenta gran **resistencia a los cloruros** muy por arriba de los rangos que causan corrosión en el acero negro.

Para que se inicie la corrosión inducida por cloruros en acero negro, deberán pasar 15 años, en cambio en el acero galvanizado, el ataque iniciará después de 44 años, una extensión de la vida en servicio de casi 3 veces antes que ocurra ataque al acero expuesto

7.3 Migración de Productos de Zinc en la Matriz de Cemento

Las fotografías muestran la forma en que migran de productos de Zinc en la Matriz de Cemento.

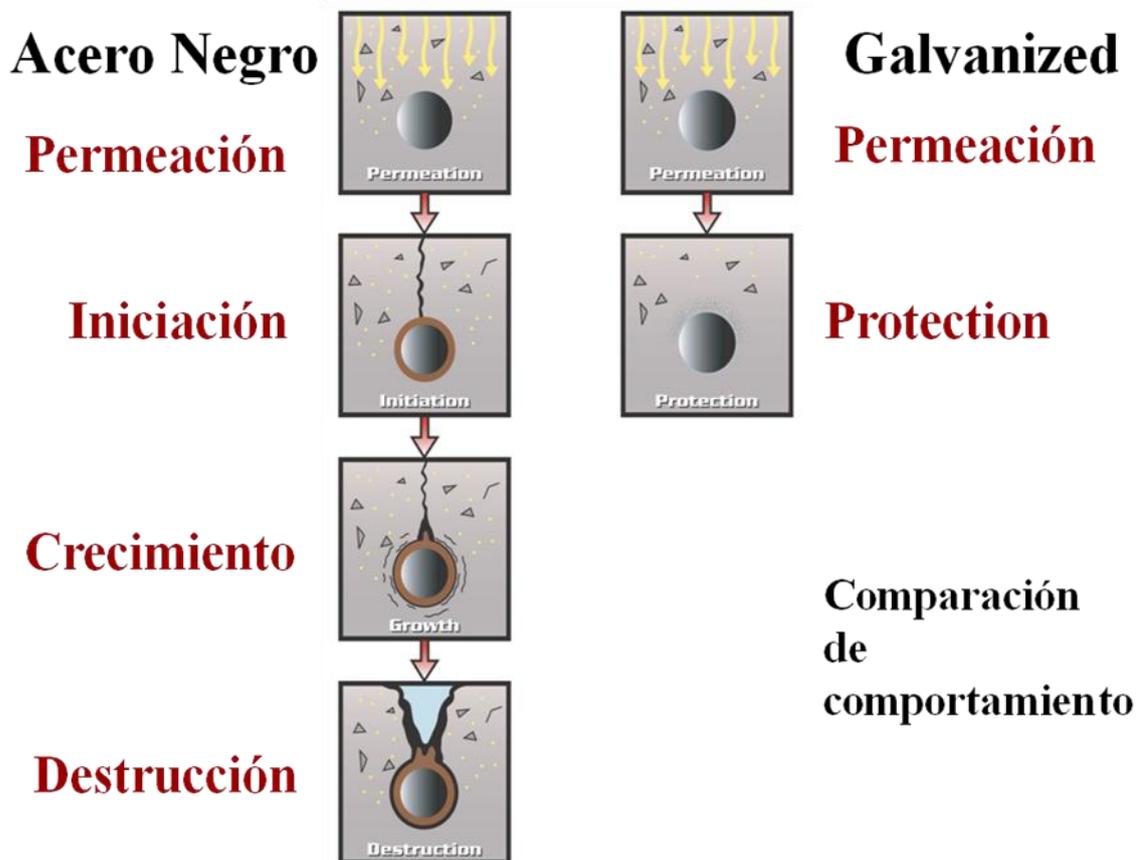


El Recubrimiento de zinc esta a la izquierda. Los productos de corrosión del zinc (ZnO) aparecen blancos contra la matriz de cemento rica en calcio. Las grandes partículas son arena. (4)

Multi-etapas de Protección del Zinc

- **Iniciación:** Significativo retraso debido a efectos nulos de carbonatación y mayor tolerancia, respecto del acero negro, del galvanizado a los cloruros.
- **Protección:** Es proporcionada sobre largo término una vez que el recubrimiento empieza a disolverse.
- **Propagación:** Corrosión activa del refuerzo expuesto hasta después de la pérdida local total de recubrimiento de zinc.

El siguiente esquema se presenta un comparativo entre el comportamiento del acero negro y el acero galvanizado:



8. Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado Galvanizado

8.1 Condiciones generales:

El refuerzo galvanizado puede ser considerado como reemplazo directo para el tradicional acero negro en todos los diseños de concreto reforzado y en la construcción y no se requiere aplicar consideraciones de diseño distintas y no se necesitan materiales especiales para el concreto o aditivos. Al usar Refuerzo Galvanizado debe ser notado que no es conveniente mezclar galvanizado y acero negro, a menos que la unión resida profundamente en la masa de concreto, donde ambos metales permanecen pasivos y es preferible usar acero galvanizado totalmente para evitar errores al posicionar y mezclar las barras.

De otro lado, la fabricación del acero (soldadura, corte, doblez) deben ser realizados idealmente antes de galvanizar, puesto que el galvanizado post-fabricación proporciona protección total a bordes y uniones expuestas.

Finalmente y con el debido cuidado y puesta en práctica de algunos puntos básicos durante la fabricación, el daño al recubrimiento y la necesidad de reparación puede ser minimizado.

8.2 Fabricación de Productos Galvanizados

Las barras de refuerzo y otros componentes deben fabricarse antes de la galvanización, pues el galvanizado después de su 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.

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.

8.2.1 Galvanizado y Propiedades Mecánicas

Para el caso de los anteriores aceros endurecidos en frío (cold- twisted), serie 410C, el material se ve afectado por el doble trabajo en frío (manufactura + doblado) y puede ser fragilizado por el galvanizado; para este caso se requiere tratamiento térmico para liberar esfuerzos.

Para el caso de los actuales aceros revenidos y templados o grados micro-aleados, serie 410Y, el galvanizado se realiza satisfactoriamente sin necesidad de requerimientos especiales y sin efecto significativo en la resistencia y la ductilidad.

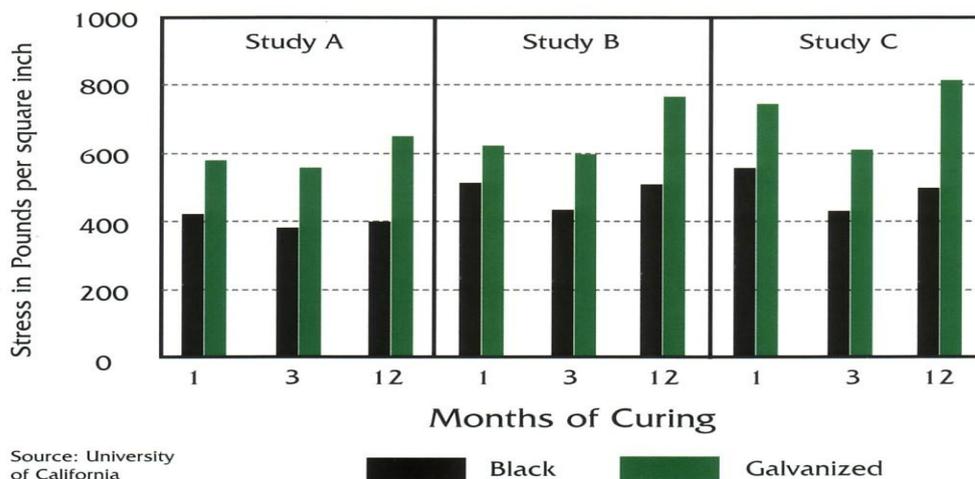
En las Barras de nueva generación grado 500 MPa (500N), se encuentra que las propiedades mecánicas son retenidas después del galvanizado en caliente; Algunas pruebas, de hecho muestran ligero incremento en el esfuerzo de cadencia, el esfuerzo último y ductilidad.

Tabla 2: Propiedades mecánicas y efecto del galvanizado

PROPIEDAD	EFFECTO DEL GALVANIZADO
Esfuerzo de Tensión	Ninguno, respecto al no galvanizado
Doblado	Ninguno, respecto al no galvanizado
Tenacidad	Similar al no galvanizado

Adherencia del Refuerzo Galvanizado en el Concreto

Estudios de la Universidad de California, muestran que para varios ensayos de adherencia según los meses de curado, es esfuerzo en PSI son superiores en todos los casos como lo muestra la gráfica siguiente.(6)



A continuación se presenta un resumen de los resultados de ensayos:

- ✓ El esfuerzo de adherencia del refuerzo galvanizado no es menor que el del acero negro (muy a menudo significativamente mayor);
- ✓ Hay muy fuerte adhesión química entre el refuerzo galvanizado y el concreto;
- ✓ El deslizamiento de las barras galvanizadas bajo carga es mucho menor que el correspondiente deslizamiento de varillas de acero negro;
- ✓ La pasivación con cromatos incrementa más el esfuerzo de la adherencia del acero de refuerzo, pero no se considera necesario.

Los Cromatos en el Galvanizado:

En el galvanizado los cromatos son usados para evitar el “herrumbrado blanco” del acero recién galvanizado que se logra sumergiendo el acero recién galvanizado en agua conteniendo cromatos disueltos, evitando cualquier otra reacción entre la superficie de zinc (activa) y el ambiente.

Cuando el refuerzo galvanizado es embebido en el concreto, la reacción en la superficie del zinc para formar CaHZn resulta en formación de hidrógeno que podría generar burbujas de hidrógeno en la interfase de la barra y podrían reducir la adherencia del refuerzo al concreto.

La norma ASTM A767, o la ISO 14657 explican la forma de pasivar por medio de cromatos en caso de requerirse, sin embargo, no hay evidencia firme de que se reduzca la adherencia entre la barra y el concreto, sin embargo, los cementos contienen suficiente cantidad de cromatos naturales como para inducir la auto-pasivación. (4)

El papel del Hidroxizincatos de Calcio

El hidroxizincatos 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. (4)

8.3 Fabricación y Manejo de Refuerzo Galvanizado:

Algunos tópicos que deben ser recordados son: criterios para los dobleces, estrategias para soldaduras, reparación del recubrimiento, transporte y almacenamiento y técnicas de manejo de campo.

8.3.1 Resistencia a la flexión del acero galvanizado

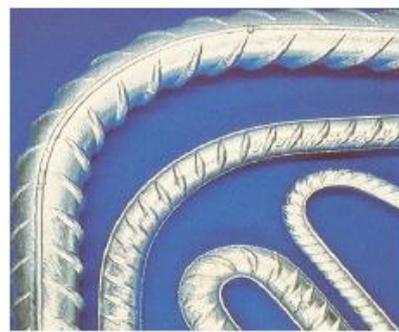
En el tratamiento de barras de refuerzo, generalmente es más conveniente y económico galvanizar longitudes rectas de la barra de refuerzo con todos los elementos previamente conformados como es el caso de los estribos.

Si se van a conformar los elementos a partir 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, sin embargo, el daño al recubrimiento puede minimizarse empleando diámetros de curvatura amplios y mandriles y matrices de tamaño apropiado.

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 descascaramiento 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.

Doblado del Refuerzo:

- Previo al Galvanizado:
 - ✓ Un diámetro de doblado $3d$ debe ser usado para minimizar trabajado en frío de la microestructura (lo cual puede resultar en fragilización por envejecido).
- Después del Galvanizado:
 - ✓ Para minimizar el agrietamiento del recubrimiento, diámetros de doblado (para doblado de 90°) es recomendable:
 - Para barra de 16 mm de diámetro, usar doblado $5d$, y
 - Para barras arriba de 16 mm de diámetro, usar mínimo $8d$.



3.3.2 Soldadura del acero galvanizado

En términos generales, el acero galvanizado puede ser soldado satisfactoriamente según los procedimientos normales de soldadura.

Solamente se requieren algunos cambios en la técnica de soldadura y debe existir ventilación adecuada; Es preferible remover el recubrimiento (desbaste, rectificado, etc.) y exponer el metal base; En donde el recubrimiento ha sido removido o dañado por 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

Para los casos en los cuales el recubrimiento ha sido afectado por alguna razón, se deben hacer reparaciones según las recomendaciones de la norma ASTM A780.

Soldaduras de base zinc – aplicadas en barra o polvo a superficies preparadas o precalentadas, sin embargo, el recubrimiento resultante puede ser bastante delgado.

Pinturas ricas en zinc – El método más común y práctico (>92% zinc metálico en la película seca), usualmente con espesor total de película de 100 µm para un desempeño óptimo contra la corrosión.

Metalizado con zinc – zinc metálico rociado (spray) (99.5% puro) sobre la superficie preparada, normalmente del mismo espesor que el recubrimiento no dañado.

Transporte y Almacenaje:

No requiere manejo o cuidado especial, se pueden almacenar directamente sobre el suelo.

Se pueden usar cadenas, cuerdas de acero o cables para elevarlas.

Usar separadores para prevenir abrasión entre innecesaria entre barra y barra;

No se requiere un lugar especial para colocarlas pero procurar drenaje y flujo de aire.

3.4 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 campo. En la Tabla siguiente, se presenta un resumen de las técnicas de manipulación que pueden ser empleadas con el refuerzo galvanizado.(6)

OPERACIÓN	RECOMENDACIÓN
Recepción del material e inspección	<ul style="list-style-type: none"> ● inspeccionar visualmente para detectar daños y ● verificar para asegurar la carga en el transporte.
Descarga y manipulación en la zona de trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> ● no es necesario ninguna manipulación especial o cuidado ● levantar paquetes en varios lugares de recogida, o

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

4. El Costo de Galvanizar:

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, con respecto al acero 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.(6)

Conclusiones

Ante la ausencia de la aplicación de los criterios de diseño y las buenas prácticas, el acero galvanizado a ser utilizado como refuerzo del concreto, se convierte en una alternativa vital para prevenir los costos asociados a la corrosión no solo en los puertos, sino en toda la infraestructura de las regiones con potenciales problemas en donde los cloruros y carbonatos se convierten en los principales enemigos del acero.

Esto es especialmente aplicable a países Latinoamericanos en donde la falta de normatividad asociada a las varillas de refuerzo, la falta de conocimiento y de mano de obra calificada, pueden afectar el desempeño de estructuras con consecuencias catastróficas no solo para la economía sino también para la infraestructura como tal.

Desde el punto de vista técnico el refuerzo galvanizado comparado con el acero negro, proporciona:

Retraso significativo en la iniciación de la corrosión (despasivación) del recubrimiento de zinc, protección de largo término hasta que el recubrimiento se disuelve y se pierde totalmente y protección catódica de sacrificio para áreas expuestas del refuerzo.

Además proporciona bloqueo completo de los efectos de la carbonatación de la cubierta de concreto, significativamente mayor tolerancia a los cloruros comparado con el acero negro (entre 2-2.5 veces), rotura mínima de la masa de concreto y un aumento en la vida útil de 4 a 5 veces.

El refuerzo galvanizado puede ser considerado como reemplazo directo para el tradicional acero negro en todos los diseños de concreto reforzado y en la construcción y no se requiere aplicar consideraciones de diseño distintas y no se necesitan materiales especiales para el concreto o aditivos.

Asociado al buen desempeño esperado para el acero de refuerzo, es de mucha importancia considerar algunos tópicos que deben ser recordados como lo son: criterios para los dobleces, estrategias para soldaduras, reparación del recubrimiento, transporte y almacenamiento y técnicas de manejo de campo.

Es muy importante también poder considerar la capacitación masiva en el tema de la protección del acero de refuerzo a empresas consultoras, constructoras e instituciones que tengan que ver con la construcción en general; se debe realizar en lo posible hacerlo en etapas tempranas de diseños de las estructuras para servir de apoyo.

Se debe trabajar de la mano con las universidades e instituciones que ya tienen estudios adelantados acerca del tema de la corrosión para unir sinergias y poder promover las ventajas del uso del acero galvanizado para concreto.

Referencias Bibliográficas

- (1) **SOTAQUIRÁ G., RICARDO, PANQUEVA, JORGE H. A., ANDRADE, HUGO H.** Integración de metodologías de Modelamiento para una aproximación sistémica a un problema de Macroeconomía Colombiana, Grupo SIMON de Investigación, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander.
- (2) **INCO**, Instituto Nacional de Concesiones, www.inco.gov.co, **DNP**, Departamento Nacional de Planeación, www.dnp.gov.co
- (3) **DE LA COTERA, MANUEL GONZALEZ** La corrosión del concreto en ambiente marino, de conferencias magistrales del I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, organizado por el American Concrete Institute, Capítulo Peruano, en diciembre de 1998.
- (4) **LOPEZ, LUIS MALDONADO** Corrosión del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto en la Conferencia: Estructuras de Concreto más durables usando Acero de Refuerzo Galvanizado por inmersión en Caliente, 2 Common Fund for Commodities 4 de mayo de 2007, México D.F.
- (5) **ECHEVERRIA, FÉLIX** Corrosión Del acero al Carbono, acero galvanizado y aluminio em diferentes atmosferas colombianas, revista Scientia ET technica, septiembre, año/vol. XIII, número 036, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, pp 7-12
- (6) **YEOMANS, STEPHEN R.** Galvanized Steel Reinforcement in Concrete. 2004. 320 p. Universidad de New South Wales, Canberra, Australia.

* * *