



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**IMPACTO DEL AMBIENTE MARINO TROPICAL EN EL COMPORTAMIENTO DE
LOS RECUBRIMIENTOS**

**O. Troconis de Rincón¹, N. Romero, O. Salas, M. Sánchez, Á. Rincon,
V. Millano y Y. Hernández**

RESUMEN

El uso de recubrimientos ha sido la mejor alternativa en el control de la corrosión atmosférica. A nivel mundial existen muchos recubrimientos para proteger al acero no sólo expuesto directamente a la atmósfera, sino también embebido en el concreto; particularmente en ambientes muy agresivos como lo son los marinos y costero-marinos. Venezuela posee un clima tropical, donde la agresividad de la atmósfera en los ambientes es muy alta, dada la alta temperatura y humedad relativa en conjunto con los altos vientos, característicos de zonas cercanas al mar. En este trabajo se presentará la experiencia alcanzada en el comportamiento de recubrimientos orgánicos y metálicos para el acero, así como recubrimientos orgánicos sobre el concreto armado, donde se demuestra la falla de recubrimientos que han mostrado un excelente desempeño en países no tropicales.

Palabras Clave: ensayos acelerados, ensayos de campo, recubrimiento.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han llevado a cabo numerosos estudios con la finalidad de determinar la eficiencia de distintos esquemas de recubrimiento, no solo para el acero al carbono y el galvanizado, sino también para el concreto. Esta preocupación dio origen al proyecto PATINA⁽¹⁾ (Protección Anticorrosiva de Materiales a la Atmósfera) perteneciente al subprograma XV del CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), el cual contó con la participación de 15 países de la región Iberoamericana, entre los que se encuentra Venezuela, aportando los resultados obtenidos a través de dos estaciones de ensayo: El Tablazo (atmósfera marina) y La Voz (atmósfera especial, caracterizada por su elevada agresividad y fuerte abrasión causada por los vientos). Este proyecto buscó establecer el comportamiento a la atmósfera durante 42 meses de exposición de diversos tipos de recubrimientos sobre acero al carbono y acero galvanizado, de los cuales los esquemas con fondo rico en cinc o galvanizado capa intermedia de epoxy y acabado de poliuretano fueron los más eficientes.

Ahora bien en Venezuela país con un clima tropical de alta agresividad, la mayor parte de las estructuras de acero e inclusive galvanizadas expuestas a ambientes marinos están mostrando deterioro en cortos períodos de tiempo. Debido a esto se plantea la posibilidad de rehabilitar estas estructuras aplicando recubrimientos. A tal efecto se utilizaron los resultados obtenidos en



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



PATINA, evaluando no solamente recubrimientos sino también la forma de preparar la superficie. Para esto se instaló una nueva estación en el Cruce del Lago de Maracaibo (atmósfera marina con fuertes vientos), donde se evaluó la velocidad de del acero galvanizado. Además, para la aplicación de los recubrimientos se utilizaron piezas estructurales (perfiles galvanizados envejecidos con 36 meses de exposición). De tal manera que se evaluaron, por triplicado, 13 esquemas de recubrimiento provenientes de 6 diferentes empresas. Adicionalmente se efectuaron ensayos acelerados en el laboratorio.

Por otra parte, como ya se indicó, otro de los materiales que en estos ambientes está mostrando un proceso acelerado de corrosión es el refuerzo en el concreto armado. Recientemente, en el proyecto Iberoamericano DURACON⁽²⁾, se ha demostrado que en ambientes tropicales el nivel de cloruros necesario para inducir a la actividad de la armadura es menor que en países con temperaturas mas bajas.

Varios países^(3,4), que presentan condiciones menos agresivas que las de Venezuela, han formulado soluciones destacándose el empleo de recubrimientos como tratamiento superficial, y haciendo especial énfasis en los llamados hidrofugantes, fabricados con polímeros a base de silanos, siloxanos y alcoxisilanos. Ambos, al ser aplicados sobre el concreto disminuyen la tensión superficial del sustrato, de modo que el agua no lo humedece y no penetra al mismo; también resisten el desgaste y permiten que el sustrato respire naturalmente, propiedad muy importante, sobre todo en países tropicales. Por consiguiente, los cloruros tampoco ingresan, ya que ellos deben difundir a través del agua por los poros. Anderson y colaboradores⁽³⁾, determinaron que en el campo de la tecnología del revestimiento los compuestos basados en polisiloxanos son utilizados como potenciales candidatos a aportar propiedades anticorrosivas y antiabrasivas, por ser un compuesto cuyas fases morfológicamente pueden ser controlables y tratables para conseguir las propiedades de interfase necesarias para una buena adhesión y capacidad para repeler el agua.

En 1997, Basheer y colaboradores⁽⁴⁾ estudiaron el comportamiento de varios tratamientos superficiales basados en la recopilación de diversas investigaciones, donde se evaluó la capacidad de “respirabilidad”, capacidad de penetración del concreto tratado con diversos sistemas, entre otras variables, determinando que los sistemas de base silano representan una barrera para el ingreso de agua y agresivos. Adicionalmente se encontró que a mayores concentraciones del agente hidrofugante se encontraban mayores efectividades del producto.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Para 1999, García y colaboradores⁽⁵⁾ estudiaron dos tratamientos superficiales en base a 100% siloxano y 20% silano en concretos y morteros expuestos en la zona de salpique del Lago de Maracaibo y evaluados mediante ensayos acelerados. Entre los resultados observados destaca un comportamiento excelente en ambos sistemas, reducción de penetración de humedad y absorción capilar, y disminución de la porosidad. Sin embargo, el sistema 100% siloxano presentó mejores resultados en permeabilidad y resistividad.

Uno de los trabajos más completos refiriéndose a la evaluación a largo plazo de la efectividad de sistemas hidrofugantes aplicados a estructuras ya en servicio es el realizado al muelle Zeebrugge, en Bélgica, por Lue Schueremans y colaboradores⁽⁶⁾, donde se estudiaron diferentes núcleos provenientes de áreas revestidas y no revestidas con un hidrofugante cuya base activa es el alquiltrietoxisilano. Dicho sistema fue aplicado al mismo tiempo que la estructura fue puesta en servicio en 1993, posteriormente fueron realizadas tres evaluaciones en los años 1996, 1998 y 2005, respectivamente, acumulándose un total de casi 12 años en servicio, estimándose que el tiempo de vida útil de la estructura en zonas no tratadas sería de 16.5 años y para las zonas tratadas de 107 años y 91 años en zonas tratadas únicamente en zonas de salpique.

En Venezuela N. Parra⁽⁷⁾ en el 2001, evaluó mediante ensayos acelerados la efectividad de diferentes sistemas hidrofugantes, base silano y siloxano, con relación a/c de 0,40, para seleccionar el mejor sistema a aplicar a la superestructura del Puente sobre el Lago de Maracaibo; que los sistemas hidrofugantes eran capaces de disminuir la capacidad de ingreso del agresivo en un concreto de esta alta calidad. Así, este trabajo evalúa el comportamiento en campo de estos productos, luego de casi seis años de exposición en una atmósfera marino-costera tropical de muy alta agresividad ($> C5$, según ISO 9223⁽⁸⁾). Adicionalmente, se compara mediante ensayos acelerados el comportamiento de estos y otros revestimientos, existentes en el mercado nacional, en función de la calidad del concreto (a/c de 0,40 y 0,65).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Substratos Metálicos y Preparación de las Probetas.

Para el desarrollo de las pruebas de este estudio se seleccionaron perfiles de 1,0 m de longitud, semejantes a los utilizados para la construcción de torres de telecomunicaciones y transmisión de energía eléctrica, además de placas de acero galvanizado nuevo de 10cmx15cmx3 mm. Los perfiles fueron de:

1.1 Acero galvanizado nuevo. Las probetas de acero galvanizado nuevo seleccionadas fueron caracterizadas utilizando metalografía, y se realizaron medidas de espesor con valores aproximados de 3,2 mils (80 μ m).



Figura 1. Muestra de Acero Galvanizado Nuevo.

1.2 Acero galvanizado envejecido.- Las probetas de acero galvanizado envejecido seleccionadas para el estudio fueron expuestas por un periodo de 36 meses para el caso de perfiles y para el caso de las placa fueron expuestas por un período de 22 meses en El Cruce del Lago de Maracaibo (atmósfera marina con fuertes vientos/ Figura 2). Las mismas fueron inspeccionadas visualmente mediante lupa estereoscópica, para determinar el grado de deterioro de las probetas y además se realizaron medidas de velocidad de corrosión.

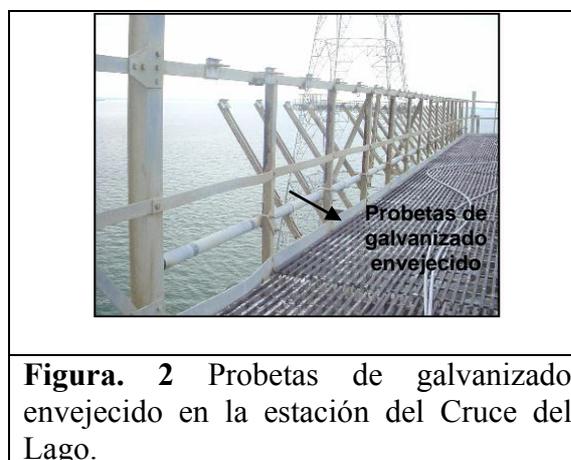


Figura. 2 Probetas de galvanizado envejecido en la estación del Cruce del Lago.

1.3. Preparación de superficie



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



1.3.1 Acero galvanizado nuevo.- La preparación de superficie de las 12 probetas galvanizadas, se realizó aplicando la norma SSPC-SP1 (limpieza con solvente), y luego un lijado suave sobre la superficie con lija de Carburo de Silicio (CSI) ANSI 200. Se realizaron además mediciones de perfil de anclaje mediante la técnica de réplica tape, obteniéndose valores promedios de 1,5 mils (38,1 μm).

1.3.2 Acero galvanizado envejecido.- A treinta perfiles envejecidos seleccionados para el estudio, se les aplicó un chorreado con agua a 124 MPa (18000 psi) en base a evaluaciones previas⁽⁹⁾. Se alcanzó un grado de preparación de superficie WJ-2M según la Norma SSPC-12. Luego se realizaron mediciones de espesor de galvanizado remanente utilizando metalografía, alcanzándose valores de 0 mils (0 μm) para el área expuesta a los vientos preferenciales y de aproximadamente 0,8 mils (21 μm) en el área resguardada de los vientos preferenciales.

1.4. Sistemas de Recubrimiento

Los esquemas seleccionados fueron: epóxico con acabado de poliuretano de seis (6) diferentes empresas de reconocida trayectoria a nivel nacional. La clasificación se realizó utilizando letras y números (Tabla 1), debido a que las empresas proporcionaron en muchos casos más de un esquema. Para la preparación de los diferentes fondos y acabados se utilizaron las especificaciones técnicas de cada fabricante. Además de estos esquemas anteriormente mencionados, se estudió un recubrimiento de nueva generación acrílico de base agua (E1). Cabe destacar que el esquema B3 solo fue aplicado sobre galvanizado nuevo, debido a que dicho producto está formulado por el fabricante para este tipo de superficie.

1.5. Aplicación de las Pinturas

Antes de la aplicación, se dividieron los perfiles en 4 secciones iguales para colocar los distintos esquemas de recubrimiento. Se utilizó brocha debido a que el estudio fue realizado para la aplicación en zonas donde se presentan fuertes vientos.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Durante la aplicación se realizaron medidas constantes de espesor de película húmeda. Luego del curado se procedió a realizar medidas de espesor de película seca (Tabla 2) e inspección visual para registrar la existencia o no de fallas. Posteriormente se realizaron pruebas de adherencia según la norma ISO 4624 obteniéndose valores para todos los esquemas superiores a 600 psi. Para facilidad en la diferenciación de las superficies evaluadas, se denominará sistema dúplex solamente a aquellos donde el recubrimiento se aplica sobre el galvanizado nuevo.

Tabla 1. Sistemas de recubrimientos a aplicar

Sistema	Fondo	Características		Acabado	Características
A1	Epóxi-poliamida con hojuelas de aluminio.	Espesor Húmedo: 5-7 mils V.U.M: 2 h	Relación: 1:1 Repintado: 8-12 h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 3-4 mils V.U.M: 8h Relación: 4:1 Repintado: 12-24 h
A2	Epóxi	Espesor Húmedo: 2-4 mils V.U.M: 12 h	Relación: 1:1 Repintado: 4 h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 3-4 mils V.U.M: 8h Relación: 4:1 Repintado: 12-24 h
B1	Epóxi modificado	Espesor Húmedo :16-24 mils V.U.M: 45 min	Relación: 4:1 Repintado: 3 h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 4 mils V.U.M: 4h Relación: 7:1 Repintado: 3h
B2	Epóxi modificado	Espeso Húmedo r: 4.9-9.8 mils V.U.M: 1 h	Relación: 5.67:1 Repintado: 4 h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 4 mils V.U.M: 4h Relación: 7:1 Repintado: 3h
B3	Epóxi modificado	Espesor Húmedo: 6-8 mils V.U.M: 2h	Relación: 4:1 Repintado: 4h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 4 mils V.U.M: 4h Relación: 7:1 Repintado: 3h
D3	Epóxi- hierro micaceo	Espesor Húmedo : 5-7 mils V.U.M: 3 h	Relación: 4:1 Repintado: 8 h	Poliuretano	Espesor Húmedo : 2-3 mils V.U.M: : 4-6 h Relación: 4:1 Repintado: 8 h
E1	Acrílico	Espesor Húmedo : 12 mils V.U.M: 60 min.		Acrílico	Espesor Húmedo : 12 mils V.U.M: 60 min.
E2	Epóxi Modificado	Espesor Húmedo : 5.5 mils V.U.M: : 90 min.	Relación: 1:1 Repintado: 16 h	No se aplicó	No se aplicó
F1	Epóxi Modificado	Espesor Húmedo : 4-8 mils V.U.M: 90 min.	Relación: 1:1 Repintado: 8 h	Poliuretano	Espesor Húmedo :2-3 mils V.U.M: : 2 h Relación: 4:1 Repintado: 30 min.
G1	Epóxi Cromato de Cinc Epóxi High Build	Espesor Húmedo : 3 mils Relación: 3:1	Espesor Húmedo HB: 6 mils Relación: 1:1	Poliuretano	Espesor Húmedo : 2 mils V.U.M: : 6 h Relación: 1:1

V.U.M : Vida útil de la mezcla.

Tabla 2. Espesores promedio de película seca de cada sistema.

Esquema	Acero galvanizado Envejecido (mils)	Galvanizado Nuevo (mils)

A1	9,2	---
A2	4,2	4,1
B1	11,0	13,4
B2	9,2	---
B3	---	12,5
F1	6,9	10,2
D3	8,8	10,9
E1	13,5	17,9
E2	6,5	9,1
G1	7,8	10,2

1.6. Ensayos de Corrosión

Para la realización de los ensayos de campo se contó con dos estaciones de ensayo: una en La Voz (atmósfera especial, caracterizada por su elevada agresividad y fuerte abrasión causada por los vientos / Figura 3)⁽¹⁰⁾ y la otra en El Cruce del Lago de Maracaibo (atmósfera marina con fuertes vientos/ Figura 4)⁽¹¹⁾.



Figura 3. Estación de La Voz



Figura 4. Estación del Cruce del Lago

Se siguió la norma ISO 2810 para la instalación de los bancos de ensayo, a excepción del colocado en la estación del Cruce del Lago donde las probetas se dispusieron en forma vertical ya que se encuentran a 108 m del nivel del Lago de Maracaibo (Figura 4). Todas las estaciones de ensayo fueron colocadas en dirección de los vientos preferenciales según cada condición meteorológica. A todos los perfiles se les realizó incisión de aproximadamente 4 cm de longitud, a 2 cm del borde inferior.

1.7. Evaluación de los Recubrimientos



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Los recubrimientos se evaluaron utilizando las normas ISO y ASTM (Tabla 3), realizando inspecciones mensuales por un periodo de 36 meses para las estaciones del Cruce del Lago de Maracaibo y La Voz.

Tabla 3. Normas de evaluación de las fallas en recubrimiento.

Falla de Recubrimiento	Norma para Evaluación
Ampollamiento	ISO4628/2
Corrosión	ISO4628/3 y ISO4628/1
Fisuramiento	ISO 4628/4
Descascaramiento	ISO4628/5
Tizamiento	ISO4628/6
Corrosión Filiforme	ISO4623
Corrosión a Partir de la Incisión	ISO4628/2

Evaluación Final: luego de todas las evaluaciones tanto cualitativas como cuantitativas, se procedió a realizar una tabla comparativa, para lo cual se estableció la siguiente clasificación: Malo (1), Deficiente (2), Regular (3), Bueno (4), Excelente (5), para posteriormente sumar cada uno de los factores y aquel que proporcione el mayor resultado será considerado el mejor esquema de recubrimiento.

2.- Evaluación de Recubrimientos para el Concreto Armado.

2.1.- Evaluación de probetas revestidas con productos comerciales a base de silano y siloxano.

Se evaluaron 6 probetas de concreto armado (Figura 5), dos blancos y dos por cada recubrimiento, elaboradas en 2001 por N. Parra⁽⁷⁾, de relación a/c de 0.40; concreto empleado en la reparación del Puente General Rafael Urdaneta. Las Tablas 4 y 5 muestran las proporciones de la mezcla, la identificación de las probetas y las características físico- mecánicas del concreto preparado, respectivamente.

Tabla 4. Materiales Utilizados en el diseño de mezcla del concreto ⁽⁷⁾.

Materiales	Cemento	Piedra	Microsilíce	Agua	Fibra	Plastificante	Arena	Relación
------------	---------	--------	-------------	------	-------	---------------	-------	----------

	(kg)	(kg)	(kg)	(lt)	(kg/m ³)	(lt)	(kg)	a/c
Cantidades (m ³ de concreto)	42,5	106,52	4,25	17	42	0,63	52,21	0,40

Tabla 5. Promedio de las propiedades físico-químicas de probetas con a/c 0.40 ⁽⁷⁾.

Característica	Tipo de Hidrofugante		
	Hidrofugante E (base siloxano) E1- E2	Hidrofugante S (base silano) S5- S6	Blanco (Sin hidrofugante) B3-B4
Porosidad Total (%)	3.16	3.81	5.50
Absorción Total (%)	1.33	1.61	2.35
Porosidad Efectiva ϵ (%)	1,59	1,78	3,24
Sorción Capilar S (m/s ^{1/2})	2,11E-05	1,70E-05	4,60E-05
Coefficiente de Absorción Capilar (Kg/m ² *s ^{0.5})	0,000337	0,000093	0,00155
Permeabilidad Iones Cloruro ASTM C1202 (Coulomb)	979	738	1502

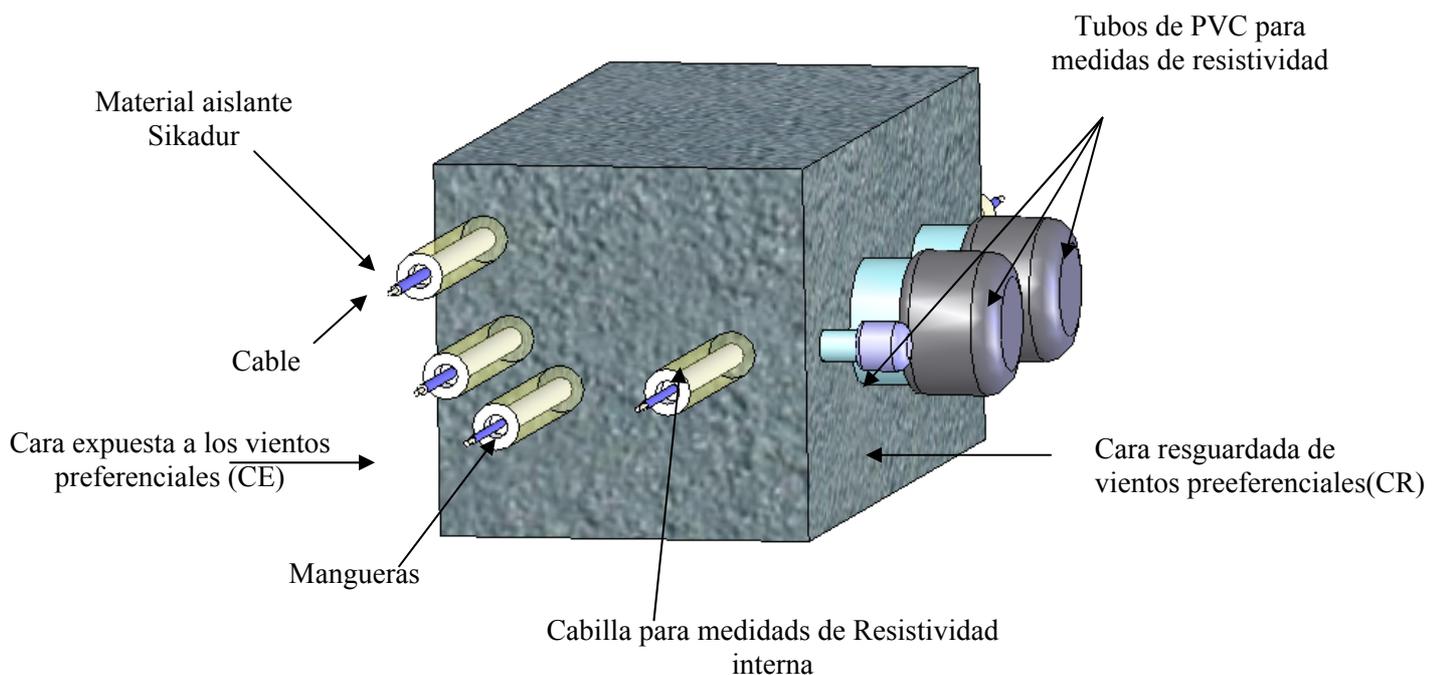


Figura 5. Detalles de la Probeta ⁽⁷⁾.

2.2.- Exposición y Evaluación electroquímica en campo. Las probetas fueron expuestas en la Estación La Voz, donde mensualmente se evaluaron los parámetros meteoro-químicos mediante ISO 9223, su clima es característico de zonas tropicales debido a la presencia de alta humedad relativa, elevadas temperaturas, alto contenido en iones cloruro y vientos predominantes. Este ambiente posee una muy alta agresividad (>C5).

Las mediciones electroquímicas en campo se realizaron con el corrosímetro GECOR 6, determinándose el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión mediante la técnica de Resistencia a la Polarización. Esta evaluación también se realizó previa a la exposición de las probetas en la estación La Voz y luego se les efectuó un monitoreo continuo por más de 5 años. Adicionalmente se midió el potencial de corrosión (E_{corr}) utilizando un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, según el procedimiento de la norma ASTM C 876-87 y el Manual de DURAR⁽¹²⁾.

Las probetas se colocaron sobre estaciones de ensayo (Figura 6), con una de las caras expuestas a los vientos preferenciales, en el siguiente orden: E1 (más alejada del mar), B3, S5, E2, B4 y S6 (más cercana al mar).



Figura 6. Vista desde la cara expuesta a los vientos preferenciales de las 6 probetas con relación a/c 0,40.

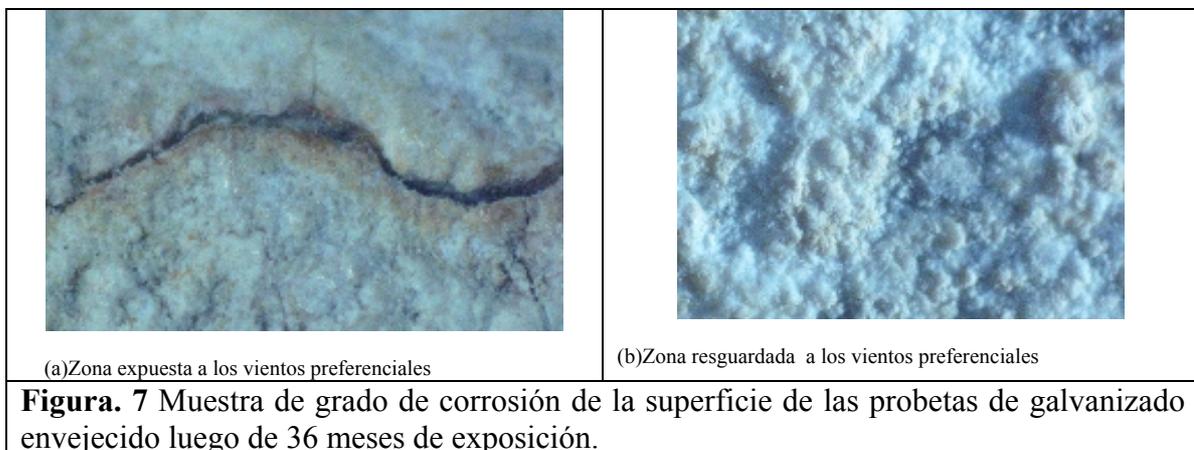
2.3.- Evaluación del ingreso de los iones cloruros. Después de 5 años y 8 meses en exposición en campo, las probetas fueron traídas al laboratorio para determinar las concentraciones de los iones cloruro (ASTM C-1152 y ASTM C-1411⁽¹³⁾). Para esto se procedió a extraer muestras en forma de polvo de la cara colocada en dirección a los vientos preferenciales (zona superior e inferior) y en las caras resguardadas mediante una técnica aplicada en el Centro de Estudios de Corrosión-LUZ⁽¹⁴⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Substratos Metálicos y Preparación de las Probetas.

1.1.- Inspección Visual y Morfología de Productos de Corrosión de Perfiles de galvanizado envejecidos por período de 36 meses.

En todos los perfiles envejecidos inspeccionados (30), se observó que en la zona expuesta a los vientos preferenciales ya no existe galvanizado, debido a la acción erosiva de los vientos sobre los productos de corrosión. En la cara resguardada de los vientos preferenciales, no se apreció el mismo efecto, existiendo corrosión leve en un 100% de la superficie, con productos de color blanco, característico del galvanizado expuesto en ambientes marinos. En cada uno de los perfiles envejecidos se observaron pequeñas grietas, las cuales son la fase inicial del proceso de exfoliación, esto se debe a que en la zona de los bordes existe un proceso de erosión severo (debido a la incidencia de los vientos en una zona tan pequeña/Figura 7), aunado a las elevadas humedades relativas y concentraciones de cloruros, los cuales difunden hacia la interfase entre los productos de corrosión, acelerando el proceso de corrosión y originando productos de corrosión voluminosos que ocasionan la exfoliación del recubrimiento.



1.2.- Placas expuestas por período de 22 meses.

En las placas expuestas a diferentes alturas (44 y 117 m); se evidencia el mismo comportamiento que los perfiles envejecidos. En relación a las alturas de evaluación no se observó una diferencia significativa en el ataque de la superficie. La velocidad de corrosión del galvanizado, utilizando las placas, se encontró en un valor máximo de 52,92 $\mu\text{m}/\text{año}$, en la zona de incidencia de los vientos preferenciales y en la zona resguardada de los mismos la velocidad de corrosión fue de 35 $\mu\text{m}/\text{año}$, estas velocidades de corrosión son elevadas para el galvanizado ya que la Norma ISO9223⁽⁸⁾ considera para la categoría de corrosividad mayor (C5) valores de 8,4 $\mu\text{m}/\text{año}$. Estos resultados demuestran que este recubrimiento no es el más adecuado para clima

con elevada presencia de cloruros, humedades relativas altas, y en especial de velocidades de viento elevadas (efecto erosivo/Figura 8).

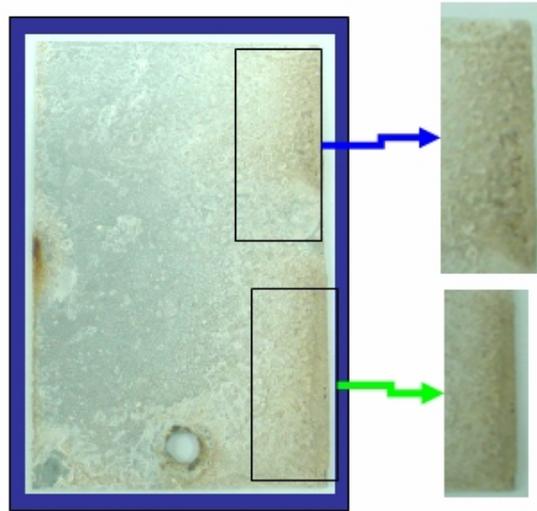


Figura 8. Probeta expuesta al medio por período de 22 meses a 44 metros del nivel del Lago de Maracaibo.

1.3. Evaluación del Desempeño de los Recubrimientos en cada uno de los Ensayos

Luego de exponer los distintos esquemas de recubrimiento por un período de 36 meses en la estación del Cruce del Lago de Maracaibo y en La Voz, los esquemas sobre acero galvanizado envejecido que presentaron mayor grado de corrosión en la superficie y en la incisión alcanzando valores promedio superiores a Ri5 (Figura 9) y ampollamientos cercanos a 5(S5) (en la incisión), fueron los identificados como F1, A1 y A2. Los esquemas que presentaron un mejor comportamiento son: E2, D3 y B2. El esquema E2 aún cuando se encuentra constituido únicamente por fondo presenta el mejor desempeño en comparación con los demás esquemas. Debido a esto se realizó un análisis de los recubrimientos mediante un Microscopio Electrónico de Barrido, utilizando la Técnica de análisis químico elemental (EDS), donde se determinó que el recubrimiento E2 posee un mayor porcentaje de Aluminio (25,6%) en comparación con los demás, los cuales se encontraron entre un rango de 9% y 1%⁽¹⁵⁾. Cabe destacar que durante los primeros meses de evaluación, el B1 fue uno de los esquemas en presentar muy buen comportamiento, pero luego de 24 meses presentó un elevado grado de fisuramiento (4(S4)c) y posterior exfoliación en la incisión, debido a la rigidez del esquema, la cual fue incrementada por la acción de la luz ultravioleta y a la presión ejercida por los productos de corrosión del acero base

(Figura 10). Este esquema puede ser inadecuado debido a que donde se genere un defecto, el recubrimiento se fisurará y exfoliará disminuyendo drásticamente su vida en servicio.

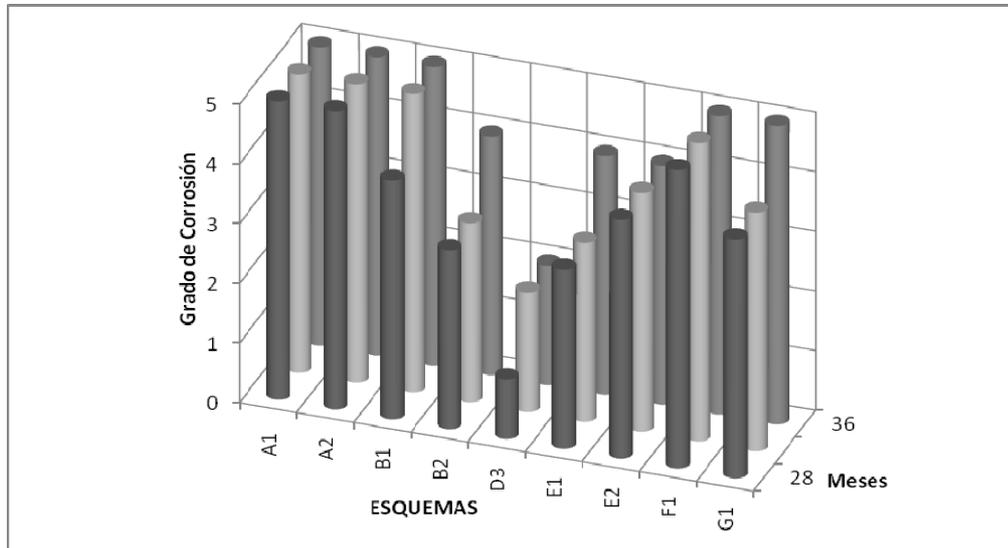


Figura 9. Grado de corrosión de la superficie de las probetas de acero galvanizado envejecido en la estación de La Voz.



Figura 10. Fisuramiento del esquema B1 sobre acero galvanizado luego de 24 meses en La Voz.

La mayoría de los esquemas aplicados sobre perfiles galvanizados nuevos presentaron un buen desempeño, sin observarse aun corrosión del acero base, por lo que al realizar las inspecciones, se reportó el grado de corrosión según los productos de corrosión del galvanizado. Pero cabe destacar que el esquema B3 se conserva casi intacto en las dos estaciones (Figura 11). El B1, al igual que en el caso anterior, sufrió un elevado grado de fisuramiento y posterior exfoliación.

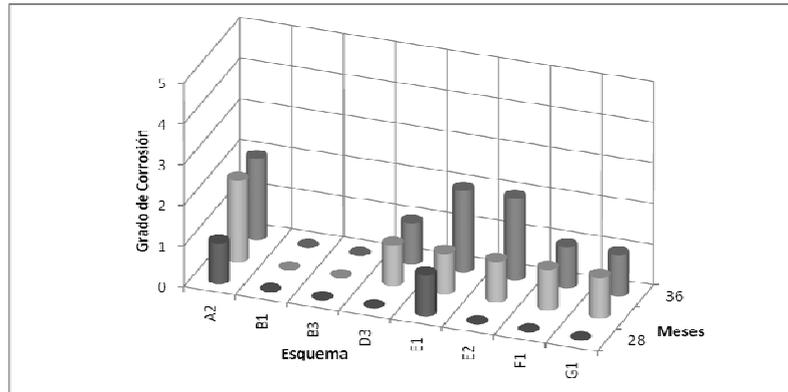


Figura 11. Grado de corrosión de la superficie de las probetas de acero galvanizado nuevo en la estación de La Voz.

Evaluación Global. Si se comparan los resultados obtenidos en las estaciones de campo se demuestra que los mejores recubrimientos sobre acero galvanizado, ya expuesto, fueron los esquemas E2, D3 y B2 y sobre acero galvanizado nuevo fue el B3; siendo los de peor desempeño para este último material, los esquemas F1, A1 y A2. Cabe destacar que el esquema B3 fue aplicado únicamente sobre acero galvanizado nuevo, por recomendaciones del fabricante del producto. Al comparar el desempeño de todos los esquemas sobre las distintas superficies en estudio, el de los sistemas duplex es mejor debido a la uniformidad y espesores del galvanizado sobre toda la superficie del acero base, lo cual brinda una mayor protección a éste.

Estos resultados son similares a los obtenidos en los ensayos acelerados⁽⁹⁾ luego de 45 ciclos (1080 h) en la cámara PROHESION⁽¹⁵⁾ y de dos meses de exposición utilizando la norma ISO 11474. Cabe destacar que aun cuando el grado de deterioro es mayor en los ensayos acelerados (lo cual se espera debido a la agresividad del ensayo), el comportamiento relativo entre los diferentes esquemas es el mismo, independiente del ensayo; lo que muestra la potencialidad que tienen estos ensayos en la evaluación comparativa de recubrimientos, especialmente al utilizar la norma ISO 11474.

Para evaluar el comportamiento de los esquemas, en los diferentes ensayos, se construyó una tabla dándole un peso a cada propiedad evaluada de la siguiente manera: Malo (1), Deficiente (2), Regular (3), Bueno (4) y Excelente (5), para posteriormente sumar cada uno de los factores y



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



aquel que proporcione el mayor resultado será considerado el mejor esquema de recubrimiento. Las Tablas 6 y 7 muestran los resultados comparativos de cada uno de los esquemas sobre galvanizado envejecido y galvanizado nuevo, donde se aprecia claramente poca diferencia en cuanto al desempeño entre cada una de las estaciones. No obstante, es importante destacar que en estos ambientes tropicales, dadas las altas radiaciones solares y gradientes de temperatura, el ensayo ISO 11474 es una excelente alternativa. Aún cuando los resultados se obtienen a más largo plazo que con la cámara PROHESION, los mismos son más confiables ya que los esquemas están expuestos a la luz ultravioleta y abrasión de los vientos, condiciones que en la cámara son difíciles de simular.

Tabla 6. Desempeño de los esquemas de recubrimiento aplicados sobre acero galvanizado envejecido.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



ESQUEMAS DE RECUBRIMIENTO	Inspección Visual		TOTAL
	Ensayos de Campo		
	Cruce del Lago de Maracaibo	La Voz	
A1	3	3	6
A2	3	3	6
B1	3	3	6
B2	4	3	7
D3	3	4	7
E1	3	3	6
E2	4	4	8
F1	2	3	5
G1	3	3	6

Malo (1), Deficiente (2), Regular (3), Bueno (4), Excelente (5).

Tabla 7. Desempeño de los esquemas de recubrimiento aplicados sobre galvanizado nuevo.

ESQUEMAS DE RECUBRIMIENTO	Inspección Visual		TOTAL
	Ensayos de Campo		
	Cruce del Lago de Maracaibo	La Voz	
A2	4	4	8
B1	4	4	8
B3	5	5	10
D3	4	4	8
E1	3	3	6
E2	4	4	8
F1	4	3	7
G1	4	4	8

Malo (1), Deficiente (2), Regular (3), Bueno (4), Excelente (5).



2.- Recubrimientos para Concreto Armado.

2.1.- Evaluación de probetas revestidas con productos comerciales a base de silanos y siloxanos, por más de 5 años. La Tabla 8 muestra la caracterización del ambiente, durante los últimos 4 años de exposición de las probetas donde se nota la muy alta agresividad del mismo (>C5 según ISO 9223).

Tabla 8.- Parámetros metereoquímicos determinados durante el tiempo de exposición en la estación La Voz, de las probetas de concreto armado de relación a/c 0,40.⁽¹⁶⁾

Año	Parámetros metereoquímicos						
	T (° C)	HR (%)	τ (horas al año)	Cl (mg/m ² xd)	SO ₂ (mg/m ² xd)	CO ₂ (mg/L)	Clasificación ISO 9223
2003	28.33	79.0	4818(τ 4)	382.33(P4)	23.3(S2)	1.29	C5
2004	28.03	78.06	4818(τ 4)	314.53((P4)	27.8(S2)	0.815	C5
2005	28.65	76.31	6132 (τ 5)	210.55(P3)	19.7(S2)	0.68	C5
2006	28.77	75.95	3451(τ 4)	264.00(P3)	14.5(S2)	0.654	C5

2.2.-Exposición y Evaluación electroquímica en campo.

Las Figuras 12 y 13 muestran la evaluación electroquímica para el período de Julio-01 a Julio-07 de las probetas expuestas en la estación La Voz. La Figura 4 y 5 presentan los resultados de E_{corr} (vs. un electrodo CuSO₄) e i_{corr} respectivamente, obtenidos durante el período de evaluación para la armadura más superficial de las probetas con relación a/c de 0,40 en la cara expuesta a los vientos preferenciales.

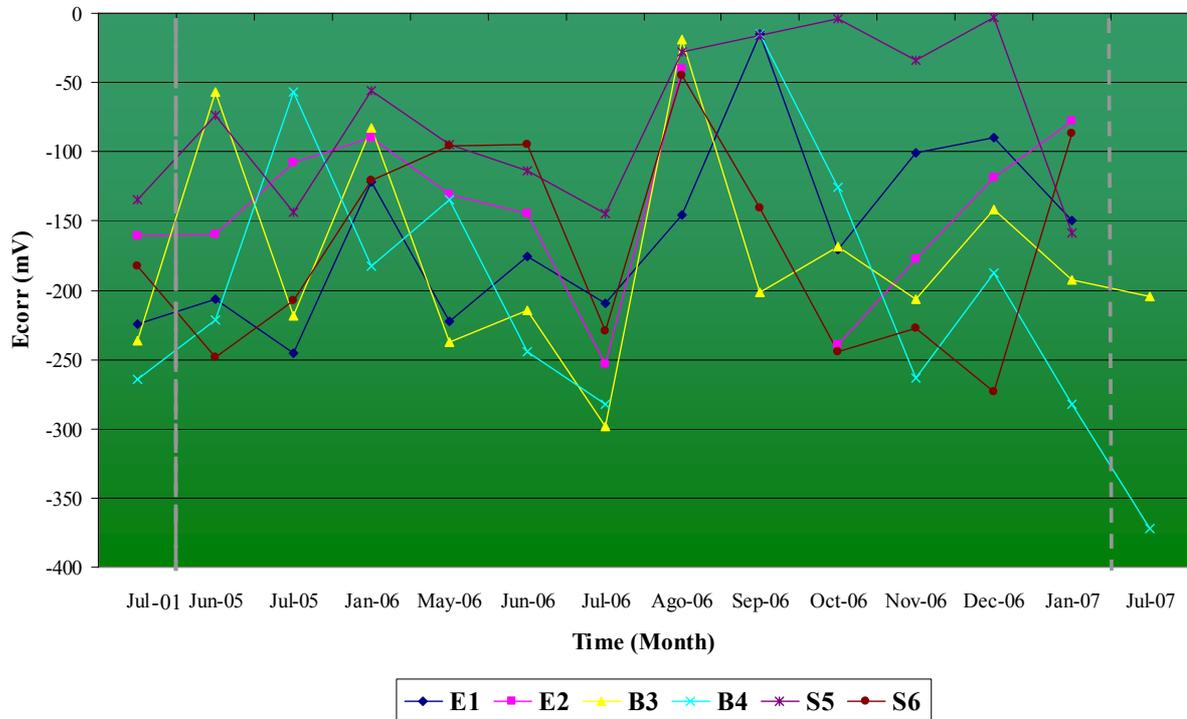


Figura 12. Potencial de Corrosión en la barra a 2,0 cm de profundidad para probetas con relación a/c 0,40, expuestas en La Voz.

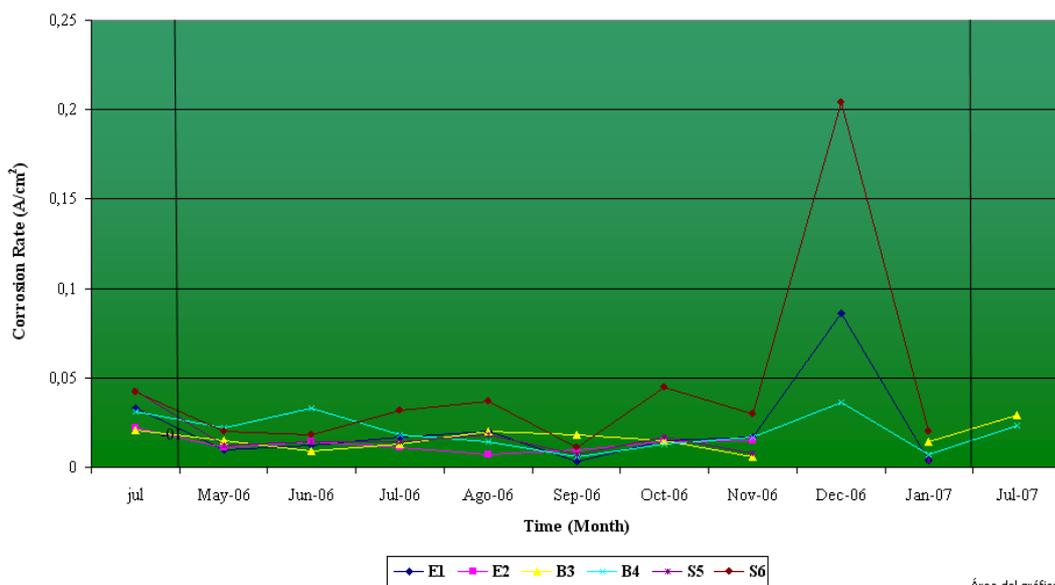


Figura 13. Velocidad de Corrosión en la barra a 2,0 cm de profundidad para probetas con relación a/c 0,40, expuestas en La Voz.

Durante el tiempo de evaluación (cinco años y ocho meses) se puede constatar que no existió activación de las barras de acero, notándose que las barras más superficiales (2,0 cm con respecto a la cara de vaciado) mostraron un comportamiento variable y en general oscilando los valores de E_{corr} entre -100mV y -200mV. Sin embargo, las barras pertenecientes a las probetas sin revestimiento se encuentran con valores de potenciales negativos ligeramente más cercanos al potencial que indica una moderada potencialidad de la barra a corroerse (-250mV vs. Cu/CuSO₄)⁽¹²⁾.

En la Figura 5 se puede apreciar que las velocidades de corrosión se encuentran muy por debajo de la considerada como nivel de corrosión moderado (0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), de hecho se puede considerar que para las velocidades de corrosión alcanzadas, el riesgo por corrosión es despreciable⁽¹³⁾. No existen mayores diferencias entre los valores obtenidos en las diferentes probetas, sean estas revestidas o sin revestimiento, lo cual se debe a la excelente calidad del concreto ($a/c= 0,40$ y contenido de cemento 42,5 Kg/cm³), y por lo tanto mayor resistencia a la penetración de agresivos, como se observa en la Tabla 5, donde se muestra que la porosidad en todos los casos es $< 5\%$ ⁽¹²⁾.

2.3.- Evaluación de iones cloruro en el concreto.

Las probetas, una vez expuestas, se llevaron al laboratorio para evaluar el efecto de los hidrofugantes al disminuir el ingreso de los agresivos. Las Figuras 14- 16, muestran los perfiles de iones cloruro soluble promedio de las dos probetas, para cada una de las diversas probetas evaluadas. Dada la diferencia existente entre los cloruros extraídos en la zona superior e inferior, por cara de las probetas, en las Figuras muestran los dos curvas se mismos en diferentes.

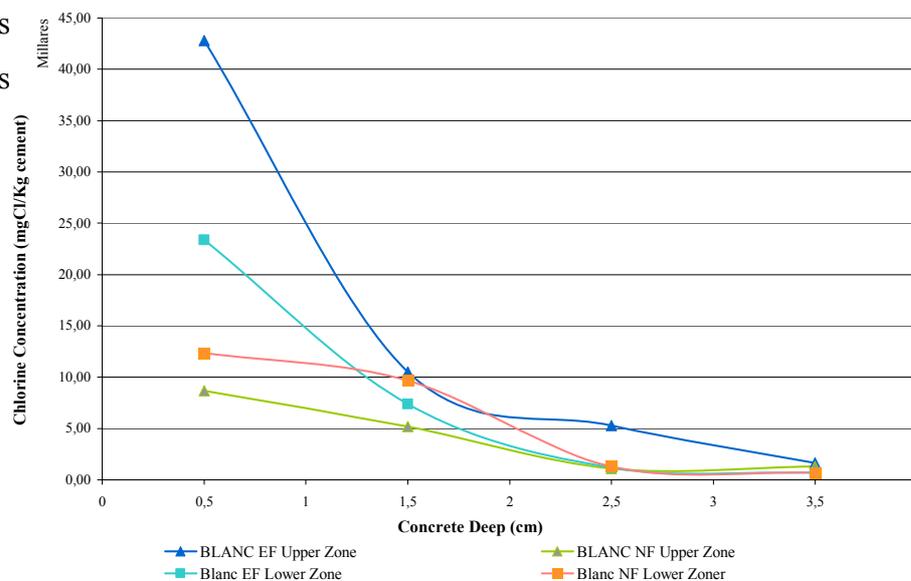


Figura 14. Perfil de Concentración del Ión Cloruro Soluble promedio en Probetas con relación a/c 0,40. Sin revestir. Expuestas en La Voz, tanto en la cara expuesta como la resguardada.

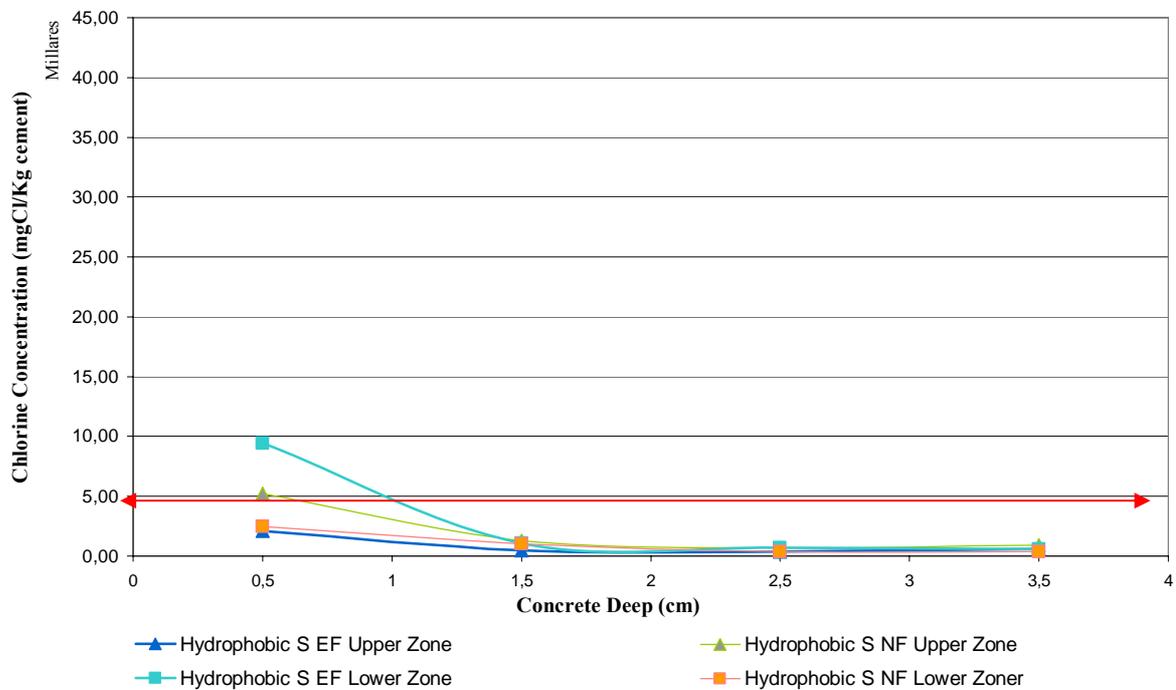


Figura 15. Perfil de Concentración del Ión Cloruro Soluble en probetas revestidas con el hidrofugante S en concreto con relación a/c 0,40, expuestas en la Voz.

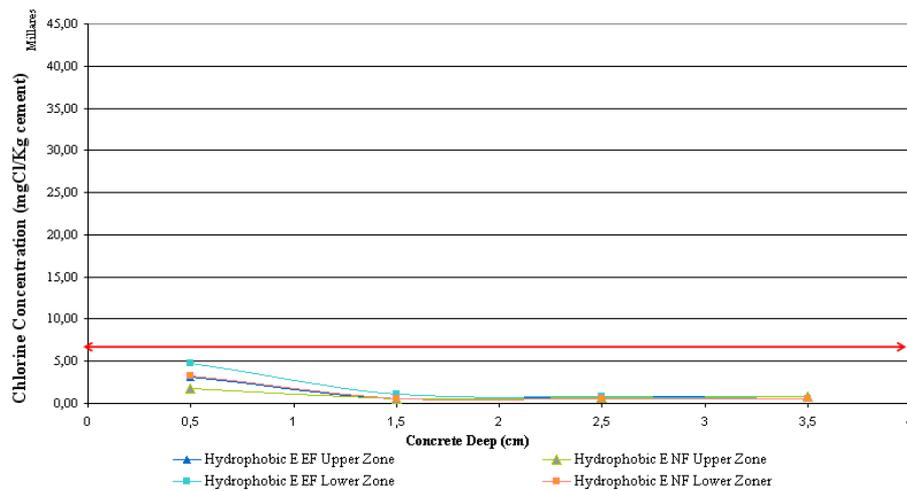


Figura 16. Perfil de Concentración del Ión Cloruro Soluble en Probetas con relación a/c 0,40 revestidas con E y expuestas en La Voz.

En estas Figuras se observa el comportamiento característico de difusión de los cloruros en el concreto, mostrándose el efecto de los hidrofugantes al disminuir la cantidad de este ión que ha ingresado, apreciándose una mejor efectividad en las probetas revestidas con el hidrofugante “E”; ya que, en general, aun superficialmente las concentraciones de cloruros son muy bajas (<4000 ppm); disminuyendo considerablemente a 2,0 cm de profundidad hasta alcanzar valores prácticamente constantes, y muy bajos (<1000ppm) por lo cual las barras aún a la menor profundidad (2,0cm) se encuentran pasivadas como se demostró con las mediciones electroquímicas. Solo en el caso del concreto sin revestimiento, los cloruros, a 2,0 cm de profundidad, se encuentran en concentraciones suficientes para inducir a la corrosión de la armadura, tanto en la cara expuesta como en la cara resguardada. No obstante, los valores de E_{corr} y i_{corr} , demuestran mayor actividad que en las probetas con hidrofugantes. Esto se debe a la calidad del concreto preparado.

Las Figuras 17 y 18, muestran el comportamiento de la difusión de iones cloruro en el concreto, resolviendo la 2^{da} Ley de Fick, considerando el coeficiente de difusión variable según el modelo de Hall por volúmenes finitos ⁽¹⁷⁾.

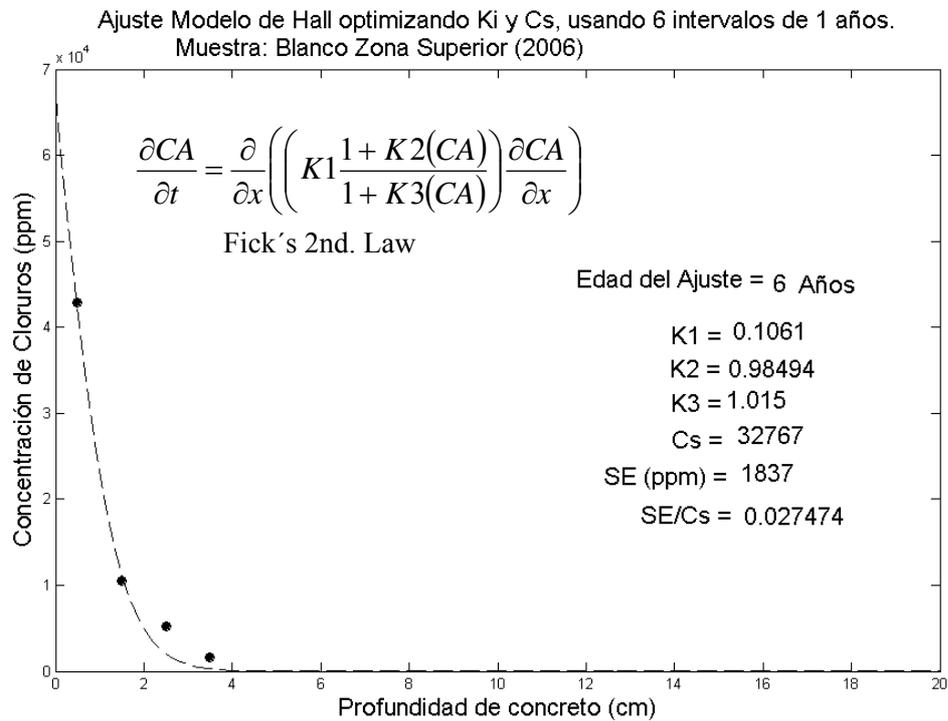


Figura 17. Ajuste por Volúmenes Finitos para obtener valores de Coeficiente de Difusión y Concentración superficial del perfil de cloruros de la zona superior de la cara expuesta de una probeta de concreto sin revestir, de relación a/c 0,40.

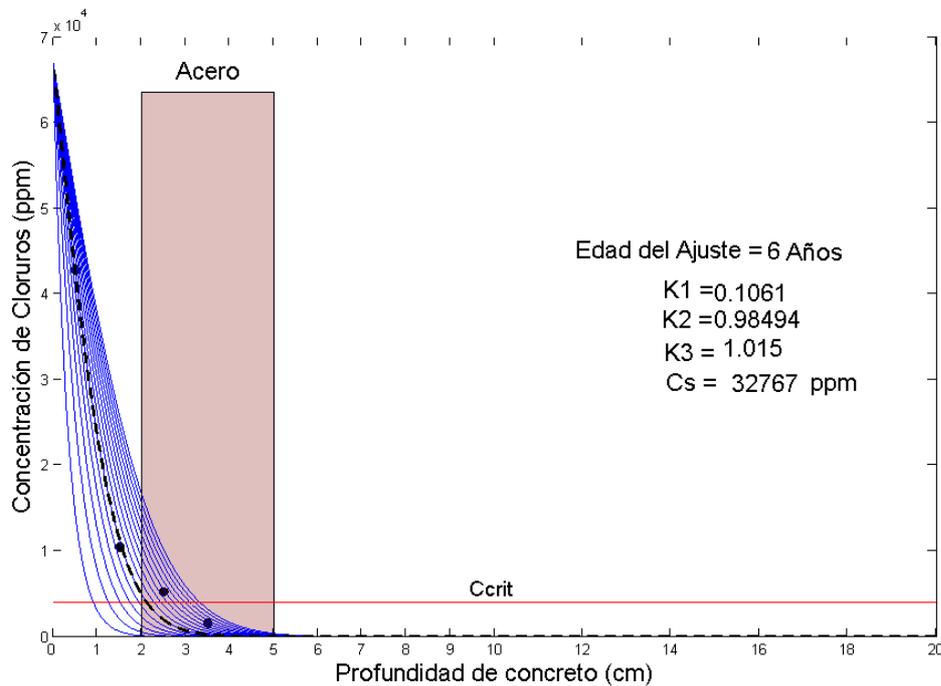


Figura 18. Predicción del perfil de cloruros para un tiempo de quince años. Zona superior de la cara expuesta de una probeta de concreto sin revestir, con relación a/c 0,40.

Al estimar el tiempo de activación de las barras utilizando este modelo (Tabla 9) en las probetas sin revestir, se observa que la barra ubicada a 2,0 cm, deberían estar activadas si se considera un umbral de 4000ppm de cloruro para despasivar a la armadura, mientras que se espera que la barra a mayor profundidad, 3cm, deberá activarse para el año 2012. Sin embargo, y pesar de las elevadas concentraciones del ión cloruro presentes, las barras ubicadas a 3,0 y 5,0 cm no se encuentran activadas de acuerdo a las mediciones electroquímicas, aunque se nota una tendencia a despasivarse, particularmente las situadas a 2,0 cm de profundidad. Los coeficientes de difusión de las probetas sin revestir (Tabla 9) demuestran lo indicado anteriormente que la cara resguardada es la más húmeda ya que son mayores a los de la cara expuesta, aún cuando los cloruros superficiales son menores, como era de esperarse dado que esta ultima se encuentra directamente expuesta a la incidencia del viento preferencial.

Tabla 9. Resultados obtenidos de la predicción del tiempo de iniciación de la corrosión utilizando el Modelo de Hall para las probetas sin revestimiento, y revestidas con S y E.

Datos de la probeta	Coef. de Dif. En Edo. Estacionario (cm ² /s)	Concentración Superficial de Cl ⁻ (kg Cl/Kg Concreto)	Tiempo de Despasivación con respecto al tiempo de exposición
Blanco, CE Zona Superior	3,96E-09	32767	Barra a 2,0cm: 5 años. Barra a 3,0 cm: 12 años.
Blanco, CE Zona Inferior	3,85E-09	32767	Barra a 2,0 cm: 6 años. Barra a 3,0 cm: 15 años.
Blanco, CR Zona Superior	9,19E-09	11319	Barra a 2,0cm: 6 años. Barra a 3,0 cm: >60 años.
Blanco, CR Zona Inferior	9,68E-09	16770	Barra a 2,0 cm: 4 años. Barra a 3,0 cm: 11 años.
Revestida con S, CE Zona Superior	5,02E-09	2950	-
Revestida con S, CE Zona Inferior	1,79E-09	18508	Barra a 2,0 cm: 32 años. Barra a 3,0 cm: 60 años.
Revestida con S, CR Zona Superior	4,21E-09	7788	Barra a 2,0 cm: 38 años. Barra a 3,0 cm: 50 años.
Revestida con S, CR Zona Inferior	7,40E-09	3315	-
Revestida con E, CE Zona Superior	3,93E-09	4562	-
Revestida con E, CE Zona Inferior	2,72E-09	7633	Barra a 2,0 cm: 42 años. Barra a 3,0 cm: >60 años.
Revestida con E, CR Zona Superior	2,42E-08	1790	-
Revestida con E, CR Zona Inferior	3,01E-09	5265	-

Según las concentraciones superficiales obtenidas entre E y S, estas son mucho mas bajas demostrándose al emplear el hidrofugante E, por consiguiente, su mayor resistencia al paso del agua y ciertamente ejerce su propiedad de “hidrofugante” si se comparan con los valores de concentración superficial de los blancos que se encuentran alrededor de 20000 ppm.

Como puede notarse en la Tabla 9, aún cuando los coeficientes de difusión para las probetas con el revestimiento E son menores, la diferencia no es tan alta como se nota en los perfiles de difusión de cloruros (Figura 15-18). Esto se debe a que el concreto utilizado es de buena calidad⁽⁷⁾



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



y lo que se manifiesta es el proceso difusional dentro del mismo, una vez que los cloruros penetran.

Es importante destacar que estos recubrimientos fueron utilizados en concretos de mayor relación a/c (0.65)⁽¹⁸⁾, demostrándose mediante ensayos acelerados que el recubrimiento S no muestra un buen desempeño. Como es conocido, estos revestimientos se adhieren y penetran dentro de los poros, por lo cual los resultados encontrados hasta el momento parecieran indicar que el mayor tamaño de poro (concreto de $a/c = 0,65$), evita que este último revestimiento pueda ejercer su acción hidrofugante, dada la baja concentración de silano en el mismo (Tabla 10), donde según el fabricante ésta se puede encontrar entre 5 y 30%. Por el contrario con el revestimiento E, ésta puede llegar al 50%. Adicionalmente, se conoce⁽⁷⁾ que el tipo de solvente también puede afectar el comportamiento de los hidrofugantes. La Tabla 10 muestra que el revestimiento E posee como solvente alcohol isopropílico, mientras que el revestimiento S posee un producto en base a compuestos alifáticos. Ciertamente ambos solventes son de naturaleza orgánica, pero el alcohol isopropílico es miscible con el agua y posee baja tensión superficial, lo cual determina la habilidad del revestimiento de expulsar agua originando depresión capilar. A su vez, los productos derivados del petróleo son inmiscibles en agua, lo cual reduce la capacidad de penetración en superficies que posean alto grado de humedad.

Tabla 10. Propiedades Físico-Químicas de los hidrofugantes seleccionados.

Propiedades	Revestimientos	
	Revestimiento E	Revestimiento S
Concentración de Silano	Menor que 50%	Entre 5%-30%
Naturaleza del Solvente	Iso-propanol	Disolvente 22-33. Orgánicos
Temperatura de Ignición	399° C	65° C
Punto de Inflamación	12° C	4° C
Presión de Vapor	Más pesado que el aire 0,800	12,5 hPa @ menos de 38° C
Densidad	-	Aproximadamente 0,8 gr/cm ³
Viscosidad	No Especificado	5 mPoise
Solubilidad en Agua	Parcial	No es Soluble

CONCLUSIONES



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



1. El galvanizado desnudo no es el recubrimiento más adecuado para un medio con elevadas presencia de cloruros y humedades relativas altas, y en especial con velocidades de vientos elevadas que erosionan paulatinamente el mismo.
2. La velocidad de corrosión del galvanizado expuesto al efecto erosivo de los vientos en la estación del Cruce del Lago de Maracaibo es de 53 $\mu\text{m/año}$ y en el área resguardada es de 33 $\mu\text{m/año}$ (\gg C5 ISO 9223).
3. La preparación de superficie óptima para galvanizados envejecidos en las condiciones de estudio es el chorreado con agua a 18.000 psi.
4. Los esquemas aplicados sobre perfiles galvanizadas presentaron muy buen comportamiento, demostrando la eficiencia de los sistemas dúplex.
5. Los resultados de difusión de cloruros en el concreto demostraron que por casi 6 años los hidrofugantes E (base siloxano) y S (base silano), evaluados en la estación La Voz (ambiente marino de alta agresividad/ $>$ C5 para acero), sobre concreto de relación $a/c = 0,40$, incrementaron la durabilidad del concreto; siendo E el mejor.
6. La evaluación electroquímica realizada muestra que todas las barras se encuentran pasivadas luego de casi 6 años de exposición; aún cuando la solución de aplicación de la segunda ley de Fick con coeficiente de difusión variable (Modelo de Hall) indicaba actividad de la barra situada a 1,5cm de profundidad en el concreto sin recubrimiento (nivel de cloruros de 4000ppm).
7. Los resultados electroquímicos parecieran indicar que para este concreto de alta calidad ($a/c = 0,40$) revestido por sistemas hidrofugantes, 4000 ppm de cloruros solubles en agua no es suficiente para despasivar a la armadura.
8. La calidad del concreto tiene un efecto importante en la efectividad del recubrimiento S, pues de los resultados obtenidos se observan diferencias apreciables cuando varía la relación a/c , teniéndose un excelente comportamiento en concretos de alta calidad y una deficiente ejecución cuando se emplean a/c altas, de acuerdo a los resultados en ensayos acelerados.
9. Todos estos resultados muestran que el revestimiento E es efectivo en reducir el ingreso de los iones cloruro en el concreto. Por el contrario, el revestimiento S, que mostró efectividad en el concreto con relación $a/c = 0,40$, no es efectivo para concretos de baja calidad ($a/c = 0,65$).



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



BIBLIOGRAFÍA

1. Morcillo M., Almeida E., Fragata F., Papossian Z., De Rincón O., et al. "Corrosión y Protección de los Metales en las Atmósferas de Iberoamérica. Parte II: Protección Anticorrosivo de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica (Red Temática PATINA, XV/CYTED)". Madrid, España, (2000).
2. O. Trocónis de Rincón et al., "The Effect of the Marine Environment on the Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Countries: DURACON Project/CYTED". Corrosion Science. Vol. 49 No. 7, July 2007. pp 2832-2843).
3. Anderson, Lawrence G. *et al.*, U.S. Patent 6,593,417 (2003).
4. Basheer, P.A.M. *et al.* "Surface treatment for concrete: assessment methods and reported performance". United Kingdom (1997)
5. García, A. *et al.* Venezuela (1999)
6. Schueremans, L. *et al.* "Chloride Penetration in RC-Structures in a marine climate: in-site survey, analysis model and benefit of a preventive hydrophobic treatment". Belgium (1993).
7. Parra, Nain. "Estudio de revestimientos hidrofugantes en concretos microfisurados expuestos al ambiente marino". Thesis to obtain the Civil Engineer Degree. Universidad Rafael Urdaneta. Venezuela (2001).
8. Normas ISO 9223. Clasificación de ambientes de intemperie para protección anticorrosiva (1994).
9. Romero N. , "Evaluación de Recubrimientos Expuestos a Ambientes Marinos y Costero-Marinos". Master Tesis. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, (2004).
10. De Rincón O., A. Rincón., De Romero M., Sánchez M., Prato M. y Fernández M. "Mapa de Corrosividad de Venezuela". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol 23 N°1. (2000) 4-13.
11. Rincón A., Trocónis de Rincón O., Rodríguez R., Romero N., de Rincón A. I. "Mapas de Corrosividad Atmosférica del Estado Zulia". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 27 No. 1, Abril (2004) 168-178.
12. Troconis de Rincón, O. et al. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. ISBN 980-296-541-3 CYTED. Segunda Edición. Red Iberoamericana XV. B. DURAR, Página 18-60. (1998).
13. ASTM. Métodos para la determinación de cloruros solubles y totales en muestras de concreto.
14. Morón, O. "Modelado de la Difusión del Ión Cloruro en mezclas de alto desempeño expuestas en Ambientes Marinos". Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia (2007).
15. Romero N., "La Importancia en la Selección Previa de un Esquema de Recubrimientos Orgánicos para Ambientes Marinos Tropicales". Trabajo de Ascenso. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. (2006).
16. Morles, Isaías y Rosillón, Daniel. "Modelos de predicción de corrosión del acero en concreto expuesto en ambientes marinos y urbanos". Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Corrosión. Maracaibo. (2007).
17. Bueno, V. "Evaluación del Uso de Volúmenes Finitos en la Estimación del Tiempo de Iniciación de la Corrosión en Armaduras". Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Corrosión. Maracaibo. (2005).



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



18. Troconis de Rincón, O., Aboulhosn, M., Morales, M.C., Bravo, J., Sánchez, M., Contreras, D., Hernández, Y., Millano, V. "Evaluation of Hydrophobic Concrete Coatings in Tropical Marine Environments". CORROSION²⁰⁰⁸, New Orleans. Louisiana. 16-20 de Marzo. NACE International. Paper 1344.