

Durabilidad de estructuras portuarias, fluviales y marítimas



Guillermo Di Pace, Ing. Civil, Académico, Consultor Privado, Argentina
 Luis Ebensperger M., Ing. Civil, PhD, Construtechnik Ltda., Chile
 Roberto Torrent, Ing. Civil, PhD, Materials Advanced Services SRL, Argentina
 Verónica Bueno, Ing. Química, PhD, Quali-TI-Mat Sagl, Suiza

Las estructuras portuarias requieren, dado su alto grado de tecnología y automatismo, los más elevados estándares de calidad en su construcción. Asimismo, es importante que tales niveles se conserven en el tiempo, sin que se vean disminuidos por patologías que pudieran afectarlos.

La “Ley de Sitter^[1], o Ley de los Cinco” (significa 5⁰, 5¹, 5², 5³), verificada en la práctica^[2], señala que basta una adecuada inversión baja/moderada en la etapa de diseño y construcción de una estructura de concreto para que reporte importantes beneficios durante su vida útil, evitando ingentes costos de reparación o refuerzo, que crecen a ritmo exponencial con la demora en la intervención si desde el inicio no se han adoptado las medidas necesarias (Figura 1). A esto deben sumarse los inconvenientes y el lucro

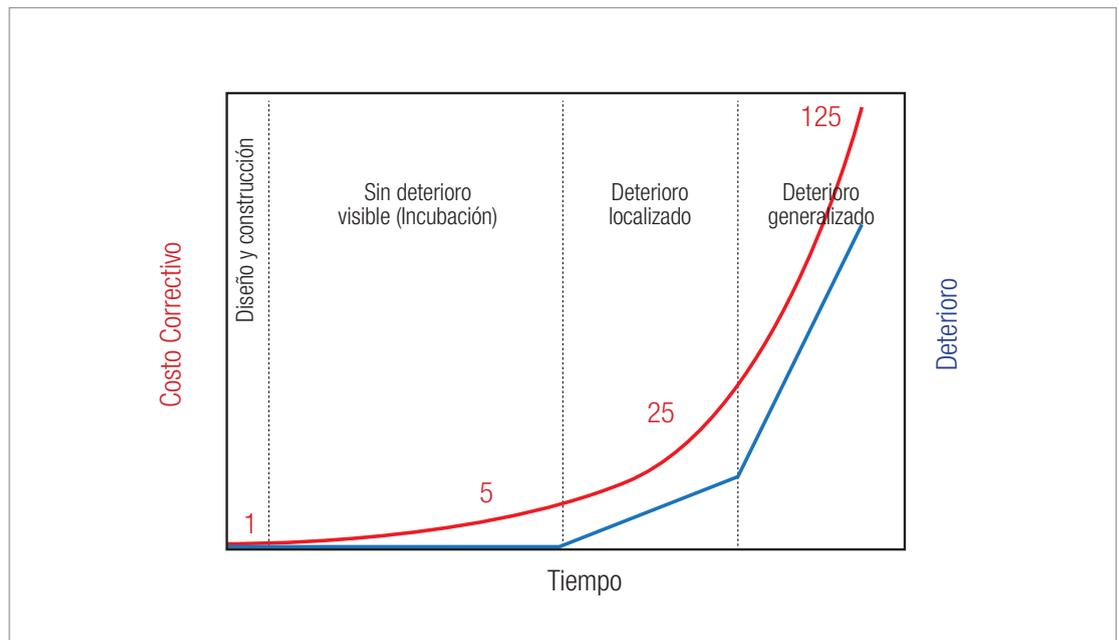
↑ Por su naturaleza, las instalaciones portuarias están expuestas al contacto permanente o frecuente con agua (dulce o salada).
 FLICKR - NICOLÁS PEREIRA

cesante resultantes de interrupciones o demoras en la operación de las instalaciones portuarias.

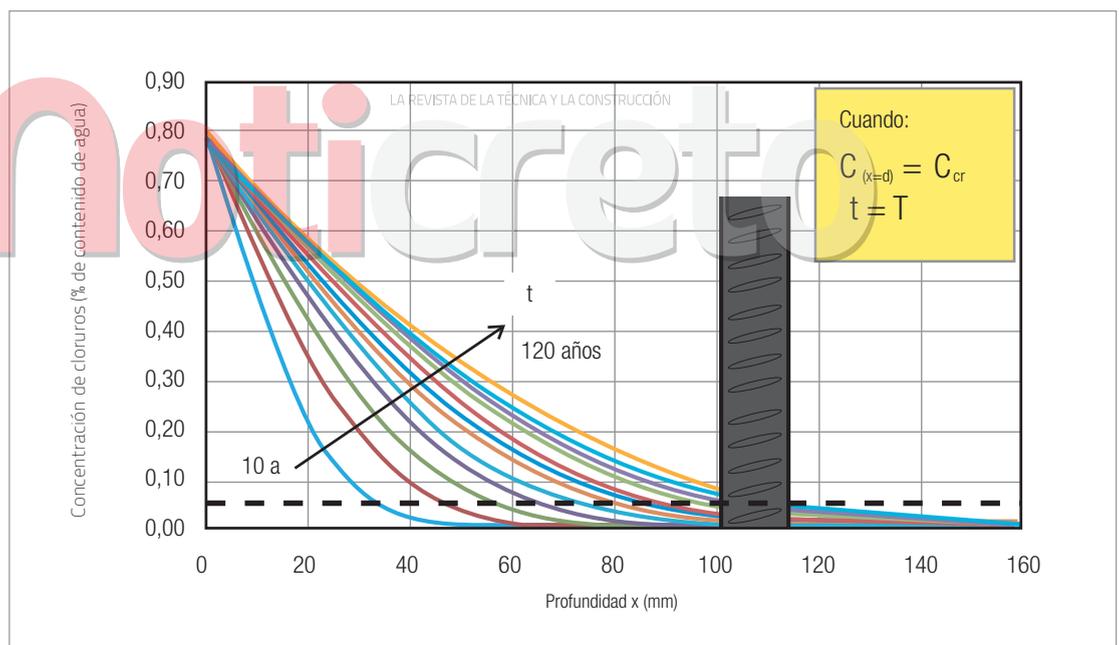
Es importante destacar que una estructura de concreto que se encuentra seca o con bajo grado de saturación es inmune a los fenómenos de deterioro físico-químicos (reacción álcali-agregado, sulfatos, congelación) o electroquímicos (corrosión del acero inducida por cloruros o carbonatación).

Por su naturaleza, las instalaciones portuarias están expuestas al contacto permanente o frecuente con agua (dulce o salada). Comparten esa condición con otros tipos de estructuras como canales, esclusas de navegación, represas, tanques, puentes sobre vías de agua, etc.

→ Figura 1 - Ley de Sitter de crecimiento exponencial de los costos por la demora en las intervenciones.
CORTESÍA MATERIALS ADVANCED SERVICES SRL



→ Figura 2 - Modelo analítico para estimar el tiempo de iniciación de la corrosión en ambiente marino.
CORTESÍA CONSTRUTECHNIK LTDA.



Esto hace que las estructuras portuarias o similares tengan alto riesgo de deterioro por los fenómenos mencionados y que deban diseñarse y construirse para prevenir su ocurrencia.

El presente trabajo resume una metodología para el diseño, ejecución, control de calidad y seguimiento de estructuras de concreto en contacto con aguas puras o agresivas, que comprende:

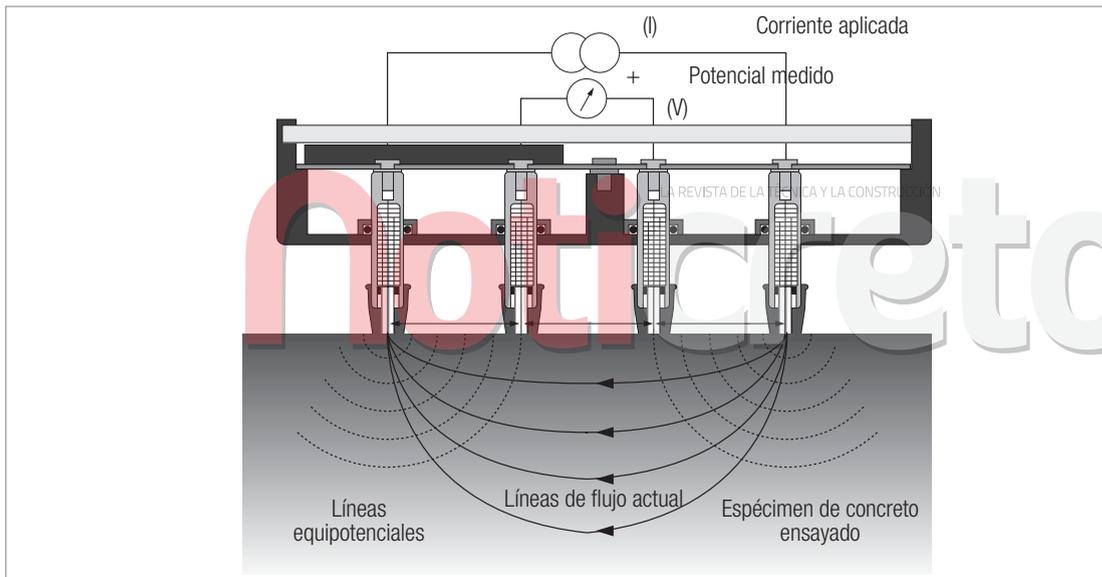
1. Etapa de Anteproyecto: se destaca la importancia de estudiar las condiciones de exposición del emplazamiento de la obra, recabar datos climáticos, relevar el estado de construcciones similares y estudiar la conveniencia de iniciar investigaciones de largo plazo

sobre el desempeño de elementos de concreto bajo exposición natural, empleando materiales de posible uso en la obra. En esta etapa se debería definir la vida útil de diseño de la estructura.

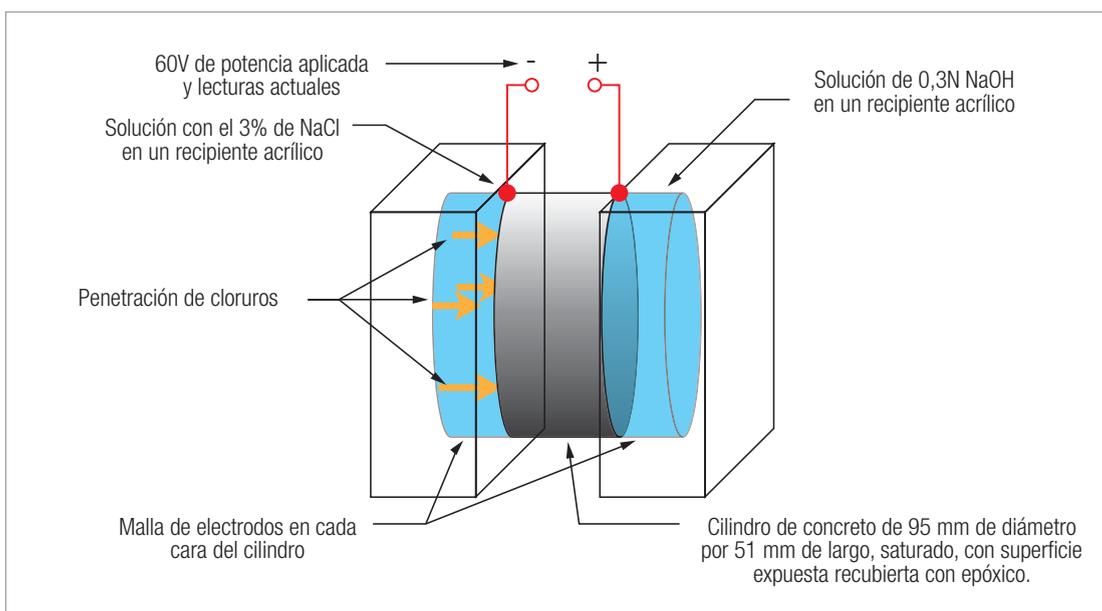
2. Etapa de Proyecto: se establece un prediseño por vida útil, con base en la información recogida en la etapa 1. Se aplican modelos analíticos de predicción del deterioro, obteniéndose distintas alternativas que permitan alcanzar la vida útil de diseño (Figura 2). Como resultado de este análisis, se especifican los materiales adecuados y las características de las mezclas de concreto a emplear. En el primer caso es relevante la elección de un tipo de cemento y agregados adecuados, que impidan la aparición de

fenómenos internos de deterioro (reacción álcali-agregado, formación diferida de etringita, calor de hidratación elevado). En el caso de las mezclas de concreto, la elección se basa en el desempeño: resistencia mecánica, resistencia al ingreso de agentes agresivos (permeabilidad, difusividad, etc.), recubrimiento mínimo del acero de refuerzo, inhibición de reacciones deletéreas, resistencia a la congelación. Igualmente, se especifican técnicas y prácticas constructivas que lleven a estructuras sanas, libres de fisuras y de otros defectos que puedan afectar la durabilidad. Se establecen límites a la permeabilidad y espesor del concreto de recubrimiento, para ser medidos "in situ" sobre la estructura terminada. Se diseña un sistema de control de calidad orientado a detectar situaciones que puedan atentar contra la obtención de la vida útil proyectada.

3. Etapa de Construcción: se verifica que los materiales y mezclas de concreto empleados respondan a las especificaciones técnicas. Se hace un control de calidad rutinario sobre los concretos empleados en la obra, basado en ensayos rápidos y significativos respecto a las acciones agresivas a prevenir: contenido de aire en el concreto fresco y resistividad eléctrica, permeabilidad al aire y agua, migración de cloruros, etc. en el concreto endurecido (Figuras 3a, 3b). De este modo se comprueba que los concretos producidos y entregados para su colocación cumplan con los requisitos especificados. También se efectúan ensayos no destructivos sobre la estructura terminada (Figura 4) para verificar que la ejecución de la obra ha llevado a un producto final de la calidad especificada (relevamiento de defectos, fisuras, ensayos de permeabilidad al aire^[7], espesor de recubrimiento, etc.).



← Figura 3a - Ensayos de laboratorio a aplicar sobre probetas moldeadas de control de calidad. Ensayo de Resistividad Eléctrica AASHTO TP95.^[3]
CORTESÍA MATERIALS ADVANCED SERVICES SRL

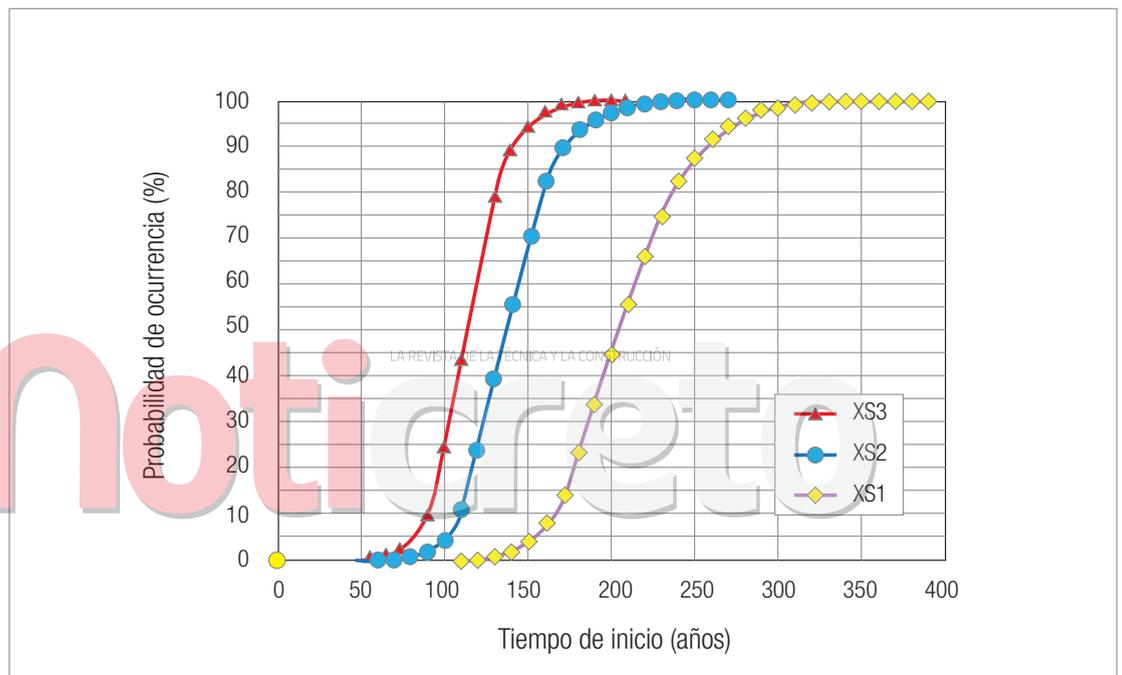


← Figura 3b - Ensayos de laboratorio a aplicar sobre probetas moldeadas de control de calidad. Ensayo de migración de cloruros según la norma ASTM C 1202.^[4]
CORTESÍA MATERIALS ADVANCED SERVICES SRL

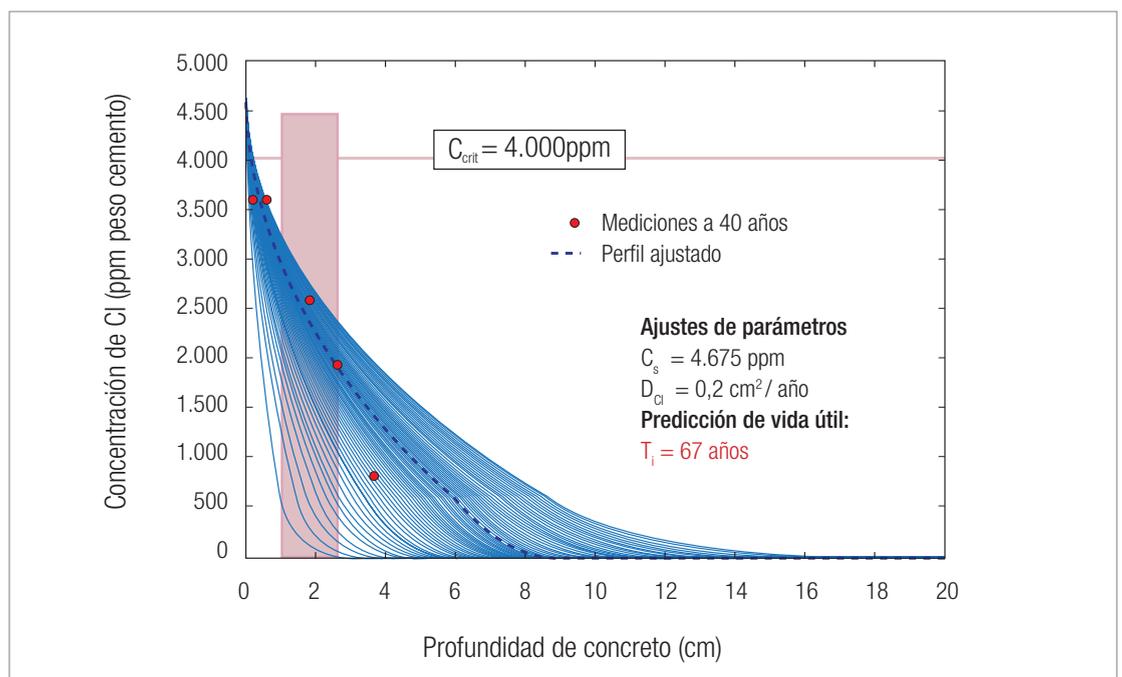
Se revisan las predicciones de vida útil a la luz de los resultados del control de calidad (laboratorio e “in situ”), realizando un análisis probabilístico de la vida útil esperable en distintas zonas de la estructura ^{18, 91}. La Figura 5 muestra la predicción de vida útil probable en el gigantesco enlace Hong Kong-Zhuhai-Macao (China), con base en mediciones “in situ” de permeabilidad al aire y espesor de recubrimiento ^{9, 101}, para tres condiciones de ambiente marino agresivo según la Norma Europea EN 206-1: XS1 (atmosférico), XS2 (sumergido) y XS3 (entre mareas), en orden de severidad.

4. Etapa de entrega de la obra: se elabora un “certificado de nacimiento” que muestra la situación de calidad de la estructura en el momento de la entrega. Contiene todos los resultados de control de calidad, tanto de laboratorio como de campo, indicando las zonas más vulnerables, bien sea como consecuencia de su grado de exposición o de sus características y propiedades. Se entrega, además, un “Manual de mantenimiento” que detalla las acciones a llevar a cabo durante la vida útil de la estructura a fin de prevenir con la máxima antelación eventuales deterioros y remediarlos oportunamente.

➔ Figura 4 - Estimación probabilística de la vida útil del enlace Hong Kong-Zhuhai-Macao ¹¹¹.
CORTESÍA MATERIALS ADVANCED SERVICES SRL



➔ Figura 5 - Estimación de la Vida Útil Residual en base a datos experimentales y análisis por FEM. ¹¹⁵¹
QUALI-TI-MAT SAGL





← Ensayo de permeabilidad al aire SIA 262/1 Norma Suiza [5].
CORTESÍA MATERIALS ADVANCES SERVICES

Estos documentos son de vital importancia para las sucesivas generaciones de ingenieros a cargo de la vigilancia y mantenimiento de estructuras que deben perdurar por varias décadas.

5. Etapa de Operación: ejecución del plan de mantenimiento establecido en la Etapa 4. Extracción de núcleos de concreto de las estructuras (o de elementos idénticos simulados a pie de obra), a intervalos predefinidos, para efectuar un seguimiento de parámetros de desarrollo de acciones agresivas: penetración de cloruros y/o carbonatación, análisis microscópico de presencia de fisuras, productos de reacciones deletéreas, etc. Esta información permite predecir con más precisión la vida útil de la estructura.
6. Etapa de devolución de consignación: en casos en que la operación de las instalaciones sean concesionadas a un privado (habitualmente el consorcio constructor) por un período de tiempo determinado, surge la pregunta de cuál es el valor residual de las mismas en el momento de devolverlas al propietario (y operador) final. Respecto a la vida útil de las estructuras de concreto, los estudios realizados en la Etapa 5 proporcionan información muy valiosa y objetiva sobre la vida útil remanente de las obras, lo cual facilita el avalúo.

Parte de esta metodología, especialmente los puntos 5 y 6, también son válidos en la toma de decisiones sobre el mantenimiento y restauración de estructuras existentes, así como para el diseño, control y seguimiento de las propias reparaciones. 

Referencias

- [1] De Sitter, W.R., "Costs for Service Life Optimization: the Law of Fives", 'Durability of Concrete Structures', Workshop Report, Ed. Steen Rostam, 18-20 May, 1980, Copenhagen, Denmark, pp. 131-134.
- [2] Wolfseher, R., "Economical aspects of repair and maintenance", 5th Intern. Workshop Material Property and Design 'Durable Concrete Structures', Weimar, Oct. 1998, pp. 33-48.
- [3] AASHTO TP95-11: "Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
- [4] ASTM C1202-12, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
- [5] Ebensperger, L. y Torrent, R., Ensayo in-situ de Permeabilidad al Aire: ¿Un medidor de Durabilidad?, X Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, CINPAR 2014, Chile, Junio 4-5, 2014.
- [6] SIA 262/1:2013, "Betonbau - Ergänzende Festlegungen (Construcción en Concreto - Especificaciones Complementarias)", Norma Suiza, 1º Agosto 2013, 52 p. (en Alemán o Francés).
- [7] BS 1881-204:1988, "Testing concrete - Recommendations on the use of electromagnetic covermeters"
- [8] Torrent, R., "Service Life Prediction: Theoretic and Realcrete Approaches", Keynote Paper, SCTM3 Conference, Kyoto, Japan, 18-21 August, 2013
- [9] Torrent, R. and Imamoto, K., "Site testing of air-permeability as indicator for carbonation rate in old structures", Intern. Confer. Regeneration and Conservation of Concr. Struct., Nagasaki, Japan, 1-3 June 2015.
- [10] Wang, Pian Pian, Dong, Gui Hong, Li, Ke Fei and Torrent, Roberto, "Durability quality control for immersed tube concrete through air permeability and electrical resistance measurement", SLD'14, Service Life Design for Infrastructure, 15-17 October, 2014, Zhuhai, China
- [11] Torrent, R., "Exp-Ref: A Simple, Realistic and Robust Method to Assess Service Life of Reinforced Concrete Structures", accepted for Concrete 2015, 30 August - 2 September, Melbourne, Australia
- [12] RILEM Recommendation CPC18, "Measurement of hardened concrete carbonation depth", Materials and Structures, v.21, n.126, Nov.-Dec., 1988.
- [13] Torrent, R., "Técnicas avanzadas para la prevención y el diagnóstico de patologías en el hormigón", X Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, Quito, Ecuador, 28-31 Mayo 1996.
- [14] Fernández Luco, L. and Torrent, R., "Diagnosis of a case of harmless alkali-silica reaction in a cracked concrete pavement", 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, Junio 1-7, 2003.
- [15] Bueno, V., Evaluación del Uso de Volúmenes Finitos en la Estimación del Tiempo de Iniciación de la Corrosión en Armaduras", Disertación Ing. Química, La Universidad del Zulia, Fac. de Ing., Centro de Estudios de Corrosión, Maracaibo, Venezuela, Octubre de 2005.