

Evaluación de Recubrimientos Superficiales en la Corrosión del Hormigón Armado en Ambientes Industriales

Autores: **Rosa Vera⁽¹⁾⁽³⁾, Judith Apablaza⁽¹⁾ y A. María Carvajal⁽²⁾⁽³⁾**

1. Laboratorio de Corrosión, Instituto de Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
2. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería, Escuela de Construcción Civil.
3. Miembros del Proyecto DURACON XV.3 del CYTED.

emails: rvera@ucv.cl, judith.apablaza.o@gmail.com, acarvajg@uc.cl

Fecha de recepción : 18/01/05
Fecha de aceptación : 02/03/05

Evaluation of Surface Coatings in the Corrosion of Reinforced Concrete in Industrial Environments

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo general estudiar el efecto protector en ambientes industriales de recubrimientos aplicados sobre hormigón armado. Para ello se preparó un hormigón con una relación de agua/cemento de 0,55 el que fue caracterizado mediante ensayos físicos y mecánicos, como resistividad eléctrica, absorción capilar, porosidad efectiva, permeabilidad a cloruros y resistencia a la tracción y compresión. Las probetas sin pintar y con recubrimientos del tipo epóxico y acrílico se expusieron a una solución ácida artificial empleada en plantas mineras durante 56 días. La corrosión de la armadura fue evaluada por medidas de potencial de corrosión y resistencia de polarización. Por otra parte, el deterioro propio del hormigón y su contaminación se determinó midiendo el perfil de profundidad de cloruro, de acidez y de sulfato. Los resultados preliminares muestran que el acero de refuerzo del hormigón en todas las muestras se encuentra en estado pasivo y que el comportamiento de los recubrimientos es epóxico > acrílico.

Palabras clave: Corrosión, hormigón, acero al carbono, ácido sulfúrico, recubrimientos.

Abstract

In this study it was investigated the protecting effect in industrial environments of coatings applied on reinforced concrete. For this, concrete was prepared with a w/c ratio of 0.55 and was characterized by mechanical and physical tests, such as resistivity, capillary absorption, total absorption and total porosity, permeability to chloride and resistance to stress and compressive strength. Samples uncoated and with epoxic and acrylic coatings, were exposed to an artificial acid solution used in mining plants during 56 days. In order to evaluate the concrete corrosion, corrosion potential and polarization resistance were measured. On the other hand, concrete wearing and its contamination were determined by measuring the depth profile of chloride, acidity and sulphate. Preliminary results show that in all samples the reinforced steel in concrete is found in passive state, and that the coatings behavior is epoxic > acrylic.

Keywords: Corrosion, concrete, carbon steel, sulphuric acid, painting.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del hormigón para la construcción de infraestructura urbana y marina se ha incrementado enormemente en los últimos años. La popularidad de este material de construcción podría ser atribuida a su versatilidad en diversas aplicaciones, simplicidad en su fabricación, diseño e instalación, su durabilidad, así como su bajo costo en mantenimiento.

Su apariencia homogénea, compacta e inerte, hace pensar que las obras elaboradas con este material tendrán una vida útil muy prolongada. No obstante, la vida de servicio de una estructura de hormigón se ve reducida por su interacción con el medio, sufriendo deterioro prematuro por reacciones con sustancias agresivas presentes en el ambiente. En general, la durabilidad del hormigón está relacionada con su naturaleza, su resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión y a causas mecánicas.

Investigaciones realizadas por distintos grupos muestran que la causa más frecuente de la pérdida de pasividad del acero de refuerzo, se debe a la difusión del ión cloruro hacia la interfase acero-hormigón dando origen a la corrosión por picado. Por tanto, es de vital importancia considerar la porosidad y las grietas del hormigón como un factor crucial en el proceso de difusión, por lo que se debe tener en cuenta el tipo de cemento, aditivos y la relación agua/cemento en la mezcla.

Desde otro punto de vista, la presencia de iones sulfatos en el hormigón también es un problema que afecta

a muchas estructuras en nuestro país, ya que estos reaccionan con los aluminatos cálcicos hidratados del clinker de cemento Portland formando etringita ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que al tener mayor cantidad de agua de cristalización provoca un aumento de volumen del orden del 250% en relación a los reactivos iniciales. Esta expansión produce tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material dando origen a una serie de fisuras y desprendimientos superficiales del material.

Estudios realizados en el comportamiento del hormigón en presencia de soluciones con pH ácido (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl) provenientes de aguas industriales, han demostrado que el hormigón sufre un deterioro mayor y más rápido debido a la formación de sales cálcicas solubles. En este caso, la acción dependerá de la concentración del ácido y de la cantidad total del mismo que actúe sobre el hormigón, ya que en algunas condiciones el debilitamiento que se produce puede terminar con la total desintegración del material.

Por otra parte, en la actualidad la mayoría de las mineras productoras de cobre presentan daños importantes en las losas de hormigón, en las fundaciones de las bombas y en los pilares que soportan las celdas de obtención de cátodos, producto de los derrames de solución ácida proveniente de la planta química. Para enfrentar este problema que involucra un costo importante para los usuarios, se ha planteado como una alternativa de protección para el hormigón la aplicación de recubrimientos con características de impermeabilizantes.

En este contexto, el objetivo general de esta investigación fue estudiar el efecto protector de recubrimientos del tipo epóxico y acrílico sobre hormigón en ambientes industriales.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la realización de este trabajo se utilizó cemento Polpaico; el hormigón grado H-25 (250 kg/cm^2) y relación agua/cemento 0,55, según la Norma Chilena 1017. Los materiales empleados referidos a 1 m^3 de hormigón fueron los siguientes: 308 kg de cemento, 154 L de agua, 959 kg de arena cuarzosa y 1039 kg de gravilla. El curado de las probetas se realizó en cámara húmeda (H.R.:90-100% y T° :17-23 $^\circ\text{C}$) por un período de 28 días.

Se prepararon probetas cilíndricas de $10 \times 20 \text{ cm}$ sin armadura y con armadura. Estas últimas están constituidas por una barra de acero corrugado (A 44-28 H) de 1 cm de diámetro y 16 cm de largo, con un área expuesta de $33,93 \text{ cm}^2$, ubicado a 2,5 cm del perímetro de la probeta.

La caracterización físicomecánica de las probetas se consiguió por medio de las medidas de resistividad, absorción total, porosidad total (Norma ASTM C642), absorción capilar (método de Fagerlund), permeabilidad a cloruro (Norma ASTM C1202), resistencia a la compresión (Norma ASTM C39) y resistencia a la tracción por hendimiento (Norma ASTM C496).

Todas las probetas confeccionadas fueron sometidas a un proceso de limpieza antes de ser pintadas. El proceso de pulido del hormigón se realizó con un esmeril, de modo de dejar la superficie libre de conta-

minación, otorgar la rugosidad necesaria al hormigón e incrementar la superficie neta sobre la que se depositará la pintura, logrando de esta forma una buena adherencia del recubrimiento al sustrato.

Posteriormente, probetas pintadas y sin recubrimiento, tanto con armadura como sin armadura, fueron sumergidas en una solución corrosiva que contenía 180 g/L de H₂SO₄ (pH 1.4-1.6) y 70 ppm de Cl⁻, por un tiempo de 56 días. En la Tabla 1 se indican las especificaciones de los recubrimientos empleados en este estudio.

Las medidas electroquímicas que presenta el acero en función del tiempo, se determinaron mediante potencial a circuito abierto (Ec) y resistencia a la polarización (Rp). El equipo utilizado fue un Potenciostato-Galvanostato Gsec 2.0, utilizando como electrodo de referencia el de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄ saturado) y como contraelectrodo una lámina de cobre.

El carácter ácido del hormigón después de los ensayos se determinó semicuantitativamente por medio del indicador fenolftaleína (Norma UNE 112-011-94) y por determinación de pH en el polvo en solución mediante un pHmetro. Además,

Tabla 1: Características de los Recubrimientos Empleados.

Muestra	1	2	3
Resina	Epóxica (Bisfenol A + Epiclorhidrina)	Epóxica (Bisfenol A + Epiclorhidrina)	Acrílica
Endurecedor	Poliamina alifática (sin solvente)	Poliaminoamida (con solvente)
Color	gris	verde	Sin
Consumo teórico	600 gr/m ² dos capas	1.500 gr/m ² dos capas	400 gr/m ² dos capas

1 capa = 25 μm

la determinación de cloruros libres en función de la profundidad se realizó mediante el método volumétrico de Volhard (Norma UNE 112-010-94) y la determinación de sulfatos se realizó por gravimetría (Norma UNE 370-75 y UNE 3171).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización físico-mecánica del hormigón

La caracterización físico-mecánica del hormigón se indica en la Tabla 2 y corresponde a los valores establecidos para una mezcla de relación a/c: 0,55. Este hormigón al ser de moderada calidad permitirá en un determinado grado el acceso de agentes agresivos, en este caso, principalmente los iones hidronio, cloruros y sulfatos, permitiendo así que estos deterioren en un menor tiempo el hormigón y su armadura de refuerzo.

Tabla 2: Propiedades Físico-Mecánicas del Hormigón.

Propiedades	Mezcla a/c: 0,55
Resistencia a la Compresión (MPa)	22,4
Resistencia a la Tracción (MPa)	1,7
Absorción Total (%)	3,4
Porosidad Total (%)	13,8
Porosidad Efectiva (%)*	13,1
Absorción Capilar (k/m ² s ^{1/2})*	2,7 x 10 ⁻²
Resistencia a penetración de agua, m(s/m ²)*	1,1 x 10 ⁸
Sorción Capilar, S (m/s ^{1/2})*	2,0 x 10 ⁻⁴
Permeabilidad a Cloruros (Coul)*	6910

* La determinación se realizó en la cara de vaciado.

Determinación de la acidez en el hormigón

La apariencia superficial de las probetas después de un tiempo de ensayo de 56 días en el medio ácido industrial mostró un deterioro marcado (pérdida de masa y formación de poros) en el hormigón sin recubrimiento y en menor grado para aquel pintado con acrílico. En cambio, para aquellas muestras protegidas con epóxico solo se observó una variación en la tonalidad del color del recubrimiento.

Por otra parte, en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos mediante el ensayo de la fenolftaleína en función de la profundidad de penetración del ácido. En ella se observa que el mejor comportamiento como barrera al medio ácido lo presenta el recubrimiento epóxico 2.

Tabla 3: Profundidad de Acidez de las Muestras Después de Ser Expuestas Durante 56 Días al Medio Industrial.

Muestra	Profundidad acidez (mm)
Hormigón sin recubrimiento	12,00
Hormigón/acrílico	0,76
Hormigón/epóxico 1	0,43
Hormigón/epóxico 2	0,10
Hormigón sin recubrimiento, sin exponer (blanco)	0,00

En la Figura 1 se presenta la variación de pH (acidez) en función de la profundidad en el hormigón para las diferentes muestras. La probeta de hormigón que actúa como blanco no presenta variaciones de pH tal como se esperaba (pH=12,4) y en cambio, en la probeta de hormigón sin recubrimiento se observa que a los 5 y 10 mm de profundidad el pH es ácido, lo que corrobora los resultados anteriores con respecto al ingreso de solución al hormigón, no obstante a partir de los 15 mm de profundidad el ambiente es más básico con un pH alrededor de 11,3, el que se mantiene constante en las cercanías de la armadura. La muestra pintada con acrílico presenta un comportamiento similar, pero ésta alcanza pH básico a partir de los 10 mm de profundidad (pH=11,5). Con respecto al hormigón pintado con epóxico 2 el material siempre se mantiene con un pH de 12, a diferencia del recubrimiento de epóxico 1 que iguala el pH a los 15 mm de profundidad. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el ensayo de la fenolftaleína donde el recubrimiento epóxico 2 presenta un mejor comportamiento al medio ácido.

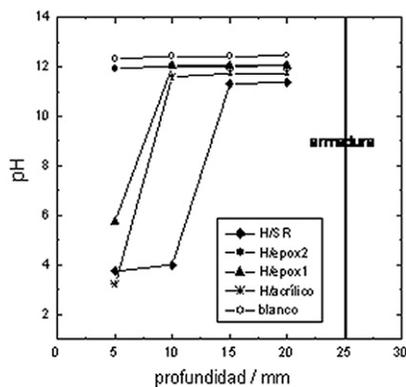


Figura 1: Variación del pH en Función de la Profundidad en el Hormigón Después de 56 Días de Exposición.

Determinación del contenido de cloruro en el hormigón

En la Figura 2 se observa el perfil de penetración de iones cloruro libres a través del hormigón. Con respecto a este punto, la mayoría de los investigadores han reportado que el umbral límite de concentración de cloruro que romperá la pasividad del acero es de 0,4 % (4.000 ppm) con respecto a cemento. Como se puede ver en la Figura, el contenido de cloruro en las cercanías de la armadura en el hormigón sin recubrimiento es bajo (0,08%), lo que confirmaría el estado pasivo del acero a los 56 días de ensayo. Este análisis también muestra contenidos mínimos de cloruro para las probetas pintadas.

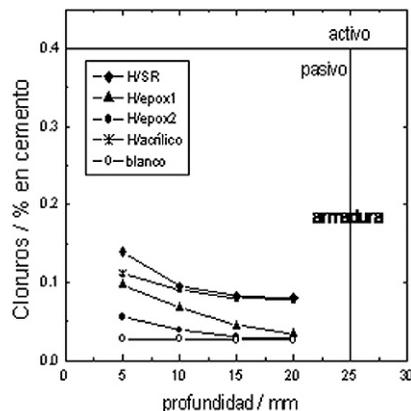


Figura 2: Perfil de Penetración de Iones Cloruro Libres en Hormigón Después de 56 Días de Exposición.

Determinación del contenido de sulfato en el hormigón

En la Figura 3 se aprecia la variación del contenido de ión sulfato (SO_4^-) en función de la profundidad del hormigón hacia la armadura. Este ión proviene del ácido sulfúrico presente en la solución industrial

e influye en parte en la degradación del hormigón por lixiviación. Los resultados muestran que a los 5 mm de profundidad el contenido de sulfato en el hormigón sin recubrimiento es 8 veces mayor al correspondiente a la muestra en blanco, muy similar al hormigón protegido con acrílico y 5 veces superior al hormigón pintado con epóxico 2. Es importante destacar que a los 10 mm de profundidad la muestra protegida con epóxico 2 presenta un contenido de sulfato similar al contenido en el hormigón sin exponer, corroborando el buen comportamiento presentado por este recubrimiento en los otros ensayos.

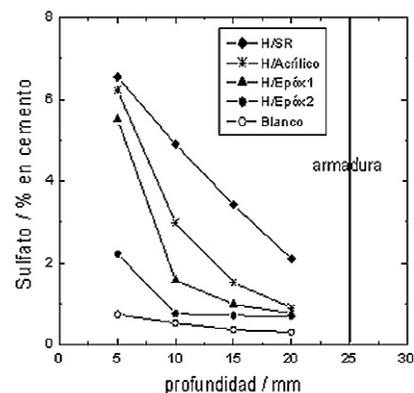


Figura 3: Variación del Contenido de Sulfato en Función de la Profundidad en el Hormigón Después de 56 Días de Exposición.

Potencial de Corrosión a circuito abierto

En la Figura 4 se muestra la variación del potencial de corrosión en función del tiempo de exposición para el acero de las muestras de hormigón. En ella se observa que antes de iniciar el ensayo ($t=0$) el comportamiento de la armadura del hormigón sin y con recubrimiento es muy similar, presentando valores de potencial alrededor de $-120 \text{ mV}_{(ECS)}$. Sin embargo,

una vez que las muestras se sumergen en el medio el comportamiento es diferente, obteniéndose un desplazamiento de potencial alrededor de 30 a 40 mV_(ECS) hacia valores más positivos para el acero de las muestras de hormigón protegidas con recubrimientos epóxicos y entre ellos mayor para el epóxico 2, corroborando el buen comportamiento de este en el medio. El potencial alcanzado por el acero en la probeta protegida por acrílico es similar al medido en el hormigón sin revestimiento. No obstante, en todos los casos los potenciales se encuentran en la zona pasiva correspondiente al diagrama de Pourbaix para el acero, lo que indicaría que a los 56 días de ensayo el metal aún

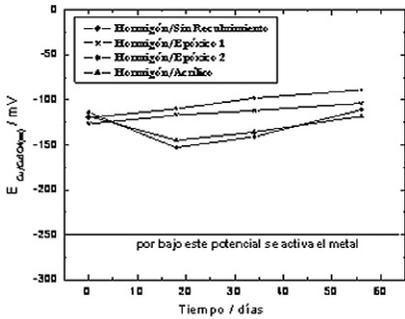


Figura 4: Potencial de Corrosión del Acero de la Armadura en Función del Tiempo para las Muestras en Estudio.

no se ha activado. La variación en el potencial de corrosión del acero, radica en la composición de cada uno de los recubrimientos. Si bien los dos recubrimientos epóxicos poseen el mismo componente básico, la viscosidad, peso molecular promedio, relación masa/área y el uso o no de solventes es diferente, y son estas características las que influyen en su distinto comportamiento.

El recubrimiento epóxico 2 al tener un peso molecular más alto, una viscosidad

baja y una cantidad de masa mayor de aplicación por unidad de área, posee un mayor poder cubritivo sobre el sustrato. Por lo tanto, este recubrimiento será menos permeable y más resistente frente al ataque de sustancias agresivas.

Determinación de la corriente de corrosión

En la Figura 5 se observa un comportamiento similar para el acero en todas las muestras y un ligero incremento en la corriente de corrosión en función del tiempo. Como es sabido, el valor de corriente de corrosión límite por sobre el cual se activa el metal embebido en hormigón es de 0,1 μA/cm², por tanto, con estos datos se corrobora el estado pasivo del metal en las condiciones de ensayo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos después de exponer las muestras de hormigón durante 56 días a la solución industrial, permiten concluir lo siguiente:

- El acero de refuerzo se encuentra en estado pasivo, tanto en el hormigón sin

recubrimiento como en aquellos con recubrimiento.

- En base a los análisis químicos, el recubrimiento que mejor cumple su función de barrera al medio ácido es el epóxico 2.
- El orden de comportamiento de las muestras en los distintos ensayos fue:

hormigón/epóxico 2 > hormigón/epóxico 1 > hormigón/acrílico > hormigón/sin recubrimiento.

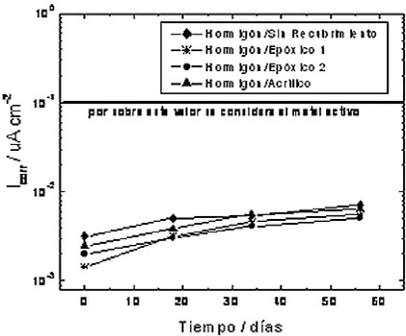


Figura 5: Corriente de Corrosión del Acero de la Armadura en Función del Tiempo para las Muestras en Estudio.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a la Industria Sika y al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED), Proyecto XV.3 DURACON.

REFERENCIAS

1. Andrade, C., Díaz, I., Helene, P., Romero de Carruyo, A. y Trocónis de Rincón, O., Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, 2ª edición, CYTED, Venezuela (1998).
2. Carvajal, A. M., Barros, E. y Vera, R., Revista de la Construcción, 2(2), 15-20 (2003).
3. Castellote, M., Andrade, C. and Alonso, C.; Corros. Sci., 44, 2409-2424 (2002).
4. Castro, P., Castillo, R. y Carpio J.J., Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones, 2ª edición, IMCYC, México (2001).
5. Castro, P. y Sanjuán, M., Acción de los Agentes Químicos y Físicos sobre el Concreto, 1ª edición, IMCYC, México (2001).
6. Castro, P., Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación, 1ª edición, IMCYC, México, (2001).
7. Castro, P., Genesca, J. and Moreno, E.I.; Cem. Concr. Res., 30, 1565-1571 (2000).
8. Chung, D.D.L. and Hou, J.; Corros. Sci., 42 (9), 1489-1507 (2000).
9. Dhir, R.K.; Cement and Concrete, 20, 579-590 (1990).
10. Glass, G., Reddy, B. and Buenfeld, N.; Corros. Sci., 42, 2013-2021 (2000).
11. Ihekweba, N.M., Hope, B.B. and Hansson, C.M.; Cem. Concr. Res., 26 (7), 1095-1107 (1996).
12. Liu, P.; Materials and Structures, 24, 302-307 (1991).
13. Maltais, Y., Samson, E. and Marchand, J.; Cement and Concrete, 34, 1579-1589 (2004).
14. Moreno, M., Morris, W., Alvarez, M. and Duffó, G.; Corros. Sci., 46, 2681-2699 (2004).
15. Neville, A.; Cement and Concrete, 34, 1275-1296 (2004).
16. Rosenberg, A., Hansson, C. and Andrade, C.; Materials Science of Concrete, 285-313 (1989).
17. Vera, R., Carvajal, A. M., Villarroel, M. y Cortés, M., Revista de la Construcción, 3(2), 83-88 (2004).
18. Vera, R. y Madrid, A.; Información Tecnológica, 14 (3), 49-56 (2003).