

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS PARA EL DIAGNOSTICO DE CORROSIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO PUENTE PEATONAL SOBRE LA AV CACHÓN

L. Arizaga¹, D. De León², E. Quaglata³, J. Grgich³

RESUMEN

Existe un número importante de construcciones que representan un enorme activo fijo, algunas de las cuales tienen además un incalculable valor patrimonial, donde se constatan distintos tipos de degradación, producto natural del tiempo o de la acción de los usuarios, y para los cuales no existe una estrategia clara de intervención.

Cuando se actúa sobre estos ejemplos generalmente es a demanda, cuando la situación ya es límite, de uso o de servicio, sin un criterio de intervención programada y constatando la ausencia de mantenimiento preventivo.

En ese contexto se debe reconocer que poco a poco va ganando terreno la necesidad de intervenir en las obras de restauración, sobre todo, con rigurosidad científica para enfrentar los problemas tecnológicos que se presentan y creando esquemas de trabajo que contemplen el estudio de los materiales componentes.

Dada la abundancia de estructuras de Hormigón Armado presentes entre las construcciones de nuestro país y de la proximidad al mar de muchas de nuestras ciudades, resulta interesante e inminente la evaluación del estado de este tipo de estructuras.

En este trabajo se realiza la implementación de técnicas de monitoreo de la Corrosión del Hormigón Armado, estudiándose una estructura de nuestra capital: el puente peatonal situado sobre la Av. Cachón, de 55 años de antigüedad, en la cual existen signos de corrosión como son: la presencia de óxidos, que se distinguen como manchas marrones y la delaminación de vigas, con acero expuesto.

Para evaluar el estado de la estructura con respecto a la corrosión se realizan los siguientes ensayos:

- *Medida del espesor del recubrimiento de Hormigón*
- *Medida de la Resistividad Eléctrica*
- *Medida de la profundidad de carbonatación*
- *Determinación de la concentración de iones cloruro*
- *Determinación de la Resistencia a la Compresión*
- *Determinación de Porosidad y Absorción de Agua*

a partir de los cuales se concluye que el riesgo de corrosión para la estructura en estudio es elevado.

1- Cátedra de Química Inorgánica, DEC, Facultad de Química, UdelAR. Gral. Flores 2124, Tel. 9241908, larizaga@fq.edu.uy.

2- IMM

3- LATU

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Las excepcionales virtudes del Hormigón Armado (en adelante HA) como material de construcción, determinan a fines del siglo XIX y principios del XX una rápida expansión de su utilización. El volumen, así como la variedad y el aspecto de las obras en HA generaron una tecnología en permanente transformación, que acumula un aporte considerable de ingenio, y este a su vez, una industria de equipos para la fabricación así como para la colocación en sitios del HA.

Como material de construcción se pensó que el HA podría tener una duración ilimitada. Sin embargo, en la actualidad se reporta un número creciente de estructuras prematuramente deterioradas por corrosión del acero de refuerzo. Esta corrosión, en general se debe al ataque destructivo de iones cloruro que penetran desde el exterior por difusión o porque fueron incorporados a la mezcla de concreto, y/o a la carbonatación del recubrimiento de concreto.

El estudio de la corrosión de la armadura del Hormigón (en adelante H) es un área claramente interdisciplinaria, donde la química, en especial la electroquímica y la cinética, tienen un papel principal. La búsqueda de una metodología precisa que lleve a una respuesta acertada sobre las causas así como los efectos de la corrosión del HA es un objetivo actual de investigación. Las expectativas señalan la importancia de un correcto diagnóstico, existiendo el riesgo de que intervenciones incorrectas reduzcan la durabilidad que tiene la estructura primitiva.²

El hormigón



Fig. 1
Trozo de
Hormigón

BOSQUEJO HISTÓRICO

El Hormigón se empleó en Asia y Egipto. En Grecia existieron acueductos y depósitos de agua hechos con este material, cuyos vestigios aún se conservan. Los romanos lo emplearon en sus grandes obras públicas y lo extendieron por todo el imperio.



Fig. 2
Escultura
romana de
Hormigón

Recién desde mediados del siglo XIX se comenzó a utilizar H en obras marítimas, y a finales, asociado con el Hierro u Acero, en forma de HA, en puentes y depósitos, habiéndose extendido su empleo tanto en obras públicas como urbanas.³

COMPOSICIÓN

El H es el producto que resulta de la mezcla de un aglomerante (como el cemento Pórtland), arena, grava o piedra machacada, y agua.³ Hoy en día la definición no solo se limita a estos compuestos básicos, ya que por adición de productos especiales (aditivos) pueden lograrse H de características muy diversas.⁴

CLASIFICACIÓN

Según su composición y cómo es trabajado y colocado en obra, recibe distintas denominaciones:

- ❖ H en masa: el que se vierte directamente en moldes y da macizos sometidos a esfuerzos de compresión.
- ❖ H ciclópeo: contiene grandes bloques de piedra embutidos en su masa.
- ❖ H Armado: contiene en su interior una armadura metálica.
- ❖ H ligero: cuando se emplean áridos de pequeña densidad o se produce desprendimiento de gases antes del fraguado, el H resulta con una densidad relativamente baja.
- ❖ H translúcido: contiene pavés o baldosas de vidrio.
- ❖ H aireado: contiene una determinada proporción de burbujas de aire.
- ❖ H pretensado: HA cuyas armaduras se tensan para que lo comprima.
- ❖ H apisonado, colado, vibrado, centrifugado, etc.: según el procedimiento utilizado para su puesta en obra.³

DOSIFICACIÓN

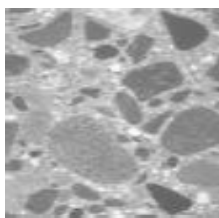


Fig. 3
Micrografía
de un
trozo de
Hormigón

Depende de la obra a ejecutar, según sea necesaria una gran resistencia, compacidad y/o impermeabilidad. Hay diferentes formas de dosificación: en volumen, en peso y la dosificación en peso y volumen, clásica para el HA que consiste en:

- Grava. 800 – 900 L
- Arena: 400 – 500 L
- Cemento: 300 – 350 kg
- Agua: 200 L

Esta dosificación se basa en que aproximadamente así se obtiene 1 m³ de H colocado en obra, después de apisonado, lo cual no siempre es cierto, dependiendo del

tamaño y forma de los áridos. El agua, es la necesaria para obtener una consistencia plástica.³

Si no se especifica, además de la dosificación, a que volumen corresponde, es una dosificación relativa. Si se conoce el volumen determinado (en general 1 m³) la dosificación es absoluta.

Por último, cabe destacar que la dosificación de los diferentes componentes varía según las propiedades que se desean obtener en el H final.³⁻⁴

FABRICACIÓN



Fig. 4
Caricatura
de una
Hormigonera

Preparación de los áridos: Se clasifican utilizando zarandas o cribas, estando ya lavados. Igualmente, se suelen adquirir clasificados.

Cemento: Debe almacenarse en sitio seco, clasificándose por expediciones y clase, para asegurar la trazabilidad.

Luego de dosificados los componentes, se procede a realizar el *amasado*. Este se efectúa sobre una superficie impermeable, mezclando en seco el árido con el aglomerante hasta obtener una mezcla homogénea en color. Luego se añade el agua en pequeñas dosis, mezclando después de cada adición. En obras de importancia, se utilizan hormigoneras, en donde las normas recomiendan un tiempo de amasado de 1 minuto, o 40 revoluciones. Pueden realizarse la dosificación y el amasado en continuo.

Una vez amasado, se realiza el *encofrado* vertiendo el H en moldes, para darle forma. Dichos moldes, son generalmente de madera o contrachapados, aunque también pueden utilizarse de plástico, caucho u otros materiales.

Generalmente la fabricación se realiza a pie de obra y la colocación debe realizarse lo más rápidamente posible. El H debe ser apisonado en los moldes, para lo cual se utilizan pisonos, o procedimientos de vibrado. Por último, cuando el H ha alcanzado el grado suficiente de resistencia para soportar el triple de la carga que haya de resistir, se realiza el desencofrado.³⁻⁴

PROPIEDADES

Peso específico: Varía con la clase de áridos y procedimiento de colocación. Para el H ligero, éste oscila entre 0,2 y 1,5; para el H apisonado ordinario, es de 2,2; para el vibrado 2,4; para el centrifugado 2,5; para H con viruta de hierro, oscila entre 4 y 5.³

Resistencia mecánica: Abarca la resistencia a la compresión, tracción y flexión, y es la cualidad más importante a buscar. Los factores que influyen en ella son: la naturaleza del ligante, la dosificación del mismo y del agua, y la granulometría de los

áridos. También deben tenerse en cuenta las condiciones termohigrométricas durante el hormigonado, el fraguado y el endurecimiento, los métodos de puesta en obra (duración del amasado, vibración) y la posible influencia de los aditivos. Se han realizado numerosos estudios al respecto como los de Feret, Bolomey, Faury, Fuller, Caquot, Duriez, Vellette.³⁻⁵

El mortero normal alcanza a los 28 días una resistencia a la compresión de 400 kg/cm² con cemento Pórtland, y resistencias mayores con cemento aluminoso y supercemento. El HA alcanza de 120 a 300 kg/cm².³

Adherencia: El HA se basa en la perfecta unión entre el cemento y el acero, resistiendo bien el primero los esfuerzos de compresión y el segundo los de tracción. Además, ambos poseen coeficientes de dilatación muy similares. Se toma como valor medio del coeficiente de adherencia 35 kg/cm² para los cementos Pórtland, supercementos y aluminosos.³

Variaciones de volumen: En el H se aprecian en general por la acción de cambios de temperatura, fraguado y endurecimiento, el estado higrométrico y las cargas que soporta.

- **Acción del calor-** El coeficiente de dilatación térmica por unidad de volumen para el H es $1,0 \times 10^{-5}$ y para el acero, $1,1 \times 10^{-5}$. Se toma entonces el valor promedio de $1,0 \times 10^{-5}$ en estructuras que no estén sometidas a altas temperaturas. El coeficiente de conductividad térmica del H es de 1,8. Una vez fraguado resiste bien las bajas temperaturas. Las altas temperaturas, producen una destrucción de las capas superficiales de un espesor de 2,5 cm disminuyendo la resistencia mecánica de manera notable a valores superiores a 700 °C. Al alcanzar los 1000 °C, pierde su identidad como material. Con áridos refractarios y cementos aluminosos se logran H que resisten hasta 1400 °C.
- **Retracción al fraguado-** Durante el fraguado y endurecimiento subsiguiente se aprecia una disminución de volumen tanto mayor cuanto más alta es la dosificación de cemento en el H, siendo menor la contracción lineal en H compactos, teniendo un valor medio de $2,5 \times 10^{-4}$ m para el cemento Pórtland y supercemento, y $4,1 \times 10^{-4}$ m para el cemento aluminoso.
- **Estado higrométrico-** El aumento del volumen producido por la absorción de agua es del orden de 3×10^{-5} m por cada 1 % de agua absorbida. El H conservado sumergido en agua después de su fabricación experimenta un aumento de 8×10^{-5} m.
- **Retracción por la carga-** denominada también deformación hidroelástica, aumenta con el tiempo, siendo directamente proporcional a la carga e inversamente proporcional al módulo de elasticidad.³

Impermeabilidad: En esta característica influyen la compacidad y la dosificación de cemento. Esta última debe ser elevada si se desea lograr una buena impermeabilidad (por lo menos de 350 kg). En efecto, no es necesario solamente que los huecos estén obturados, sino también que cada grano de los áridos esté bien envuelto por la pasta de cemento, ya que el agua a presión puede filtrarse desplazándose de grano a grano no envuelto y en contacto directo, sin atravesar la

capa de cemento que ocupa los huecos. Además, es necesario que el H no se haya amasado con un exceso de agua para que se hayan producido los geles y la textura compacta de la pasta. Las dosificaciones de cemento deben ser tanto más elevadas cuanto mayor es la superficie de los áridos, lo que lleva a la utilización de H con una mínima cantidad de arena, especialmente de la fina. Es así, que la impermeabilidad depende fundamentalmente de la relación entre la cantidad de cemento y la superficie específica de los áridos.⁴⁻⁵

Acciones eléctricas: El H es pobre conductor de la electricidad. La conductividad eléctrica disminuye a medida que lo hace la dosis de cemento en los morteros y la relación entre la arena y la grava en los H. El H de consistencia seca y apisonado presenta mayor resistividad que el plástico.

En el HA se puede apreciar que las corrientes alternas no le afectan y las continuas no le reblandecen, pero oxidan al refuerzo de hierro, que actúa como ánodo. En H secos y bien conservados al aire no se producen fenómenos electrolíticos si se toman ciertas precauciones: alta dosificación en cemento, consistencia seca, ausencia de sales para el fraguado y armaduras bien aisladas. Las corrientes de retorno y parásitas son peligrosas si alcanzan una densidad apreciable.³

Acciones químicas:

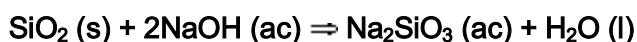


Fig. 5
Hormigón
atacado
químicamente

Algunas sustancias comunes, especialmente en aguas, como el ácido sulfúrico, húmico, carbónico y ciertas sales, como sulfatos, así como la materia orgánica, atacan al H. Esto puede evitarse protegiéndolo con enlucidos bituminosos, fluosilicatos, etc.

El agua de mar ataca los morteros y H con sulfatos y cloruros magnésicos, sustituyendo el magnesio por el calcio, formándose sulfato y cloruro clásico. El primero es insoluble y al cristalizar en forma de cuña desagrega al H. En presencia de aluminatos forma el sulfoaluminato o sal de Candlot. El cloruro de calcio se disuelve completamente. El hidróxido de magnesio, separado, impide el endurecimiento pues rodea de un gel a los granos de arena. El H fraguado resiste mejor la acción del agua de mar que el recién fabricado, ya que se suman las acciones mecánicas de las olas a las acciones químicas.

Ciertos áridos silíceos son atacados por los álcalis del cemento, formando silicatos alcalinos:



que producen un aumento de volumen por ósmosis de los geles formados.

Los áridos que producen estas expansiones que agrietan los H son la sílice opalina, calcedonia, riolita, andesita y los cementos que poseen un porcentaje de álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) mayor del 0,6 %.

Se evitan estas acciones destructoras fabricando H muy compactos e impermeables, ricos en cemento, con pequeña relación agua/cemento (a/c), añadiendo sustancias como las puzolanas, enlucidos bituminosos, fluosilicatos, cemento aluminoso, etc. Las barras de las armaduras deberán estar protegidas con una capa de H impermeable de 40 a 50 mm de espesor mínimo.³⁻⁴

En cuanto a la acción del calor, podemos separar el comportamiento químico del H en dos grupos:

- A altas temperaturas- El H no sufre grandes daños hasta los 200°C, pero es prudente no sobrepasar temperaturas de 80 a 100 °C ya que hasta aquí solamente se elimina el agua libre no combinada. A temperaturas superiores se corre el riesgo de una evaporación del agua de amasado, lo que produce el riesgo de hinchamientos perjudiciales para la obtención de resistencias correctas. En caso de incendio, las temperaturas mayores a 500 °C ocasionan que las armaduras, en el caso del HA, pierdan su resistencia, quedando las obras destruidas por hundimiento.
- A bajas temperaturas- Debajo de los 0°C el fraguado y endurecimiento prácticamente se detienen. Pueden presentarse desórdenes en la masa de los H en proceso de endurecimiento.⁴

Consistencia: Es la resistencia mayor o menor que ofrece el H a la deformación, al ponerlo en obra. Puede variar desde la tierra ligeramente húmeda recién removida (H seco) hasta una consistencia fluida que permite el vertido por gravedad (H colado) pasando por una consistencia intermedia (H plástico).⁴

Cohesión: Es la aptitud del H fresco para mantenerse unido y homogéneo.⁴

Manejabilidad: Es el conjunto de las cualidades del H fresco en cuanto refiere a su transporte y puesta en obra. Se puede variar la manejabilidad jugando con la relación cemento – superficie del árido, o mediante el uso de aditivos. La vibración también influye sobre la manejabilidad. Existen métodos para definir consistencia del H, como el de Abrams.⁴⁻⁵

Acción de los aceites y grasas: Los H compactos y de buena calidad resisten algunos aceites minerales, pero los orgánicos los atacan, saponificando la cal libre. Es así que se deben proteger con pinturas, barnices, etc.³

El Hormigón Armado



Fig. 6
Caricatura de "El
Hormigón
Armado".



Fig. 7
Armaduras
colocadas en una
estructura.

Como ya se ha mencionado, el HA se obtiene por la incorporación de armaduras (barras redondas o con salientes de acero Tor o Tentor). Estas armaduras, deben ocupar en la obra posiciones exactas según formas bien definidas determinadas previamente.

La conformación de la barras se obtiene en frío mediante la técnica de doblado. Las barras elementales de la armadura se unen luego entre si en elementos tan grandes como sea posible mediante ataduras con alambre y se ponen en posición. En general no se realiza en obra más que la unión de estos elementos entre si. La fijación en posición se logra mediante pequeñas piezas de H que quedan luego incorporadas en la masa. Por último, se coloca el H.

En lo que refiere al espesor del recubrimiento de H, se conoce que con 50 mm el riesgo de corrosión es despreciable para un H correctamente impermeable. Es importante también que no exista ninguna discontinuidad entre y dentro de la barras, y en tal caso, deben estar soldadas para asegurar contacto eléctrico entre ellas.⁴

Corrosión del Hormigón Armado



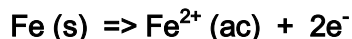
Fig. 8
Efectos de
la corrosión
en el HA.

Se trata de la corrosión del acero de refuerzo, conocido normalmente como armadura. Dicho proceso es principalmente causado por dos agentes químicos: la presencia de iones Cloruro y/o la carbonatación del recubrimiento de concreto.

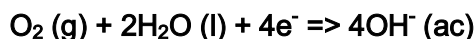
En el HA en buen estado, se da el proceso de pasivación del acero, ya que el líquido presente en los poros forma una capa protectora, compuesta principalmente por óxidos provenientes del ataque del oxígeno atmosférico e hidróxidos (NaOH, KOH, Ca(OH)₂) a causa del alto pH (13-14). El proceso en su conjunto, depende de la composición del H, de su hidratación y de la relación agua / cemento.

La corrosión del HA ocurre cuando se pierde la pasivación anteriormente mencionada y el acero queda expuesto a los agentes químicos que lo rodean. El proceso de corrosión puede representarse mediante las reacciones de una celda electroquímica:

- en el ánodo, ocurre la corrosión propiamente dicha, es decir, la oxidación del acero:



- en el cátodo ocurre la pasivación:



La conducción de la corriente eléctrica es llevada a cabo por la armadura que ejerce el contacto ánodo - cátodo y por el H que actúa como electrolito, cerrando el circuito. El oxígeno y el agua posibilitan termodinámicamente el proceso, por lo que deben estar presentes en ciertas cantidades para que el proceso tenga lugar.

Este proceso causa una falta de uniformidad, que se traduce en:

- disminución de la sección del refuerzo y hasta oxidación completa del acero.
- fisuración y deslaminación del H, a causa de la formación de una película de óxido expansiva mucho más voluminosa que el concreto.
- disminución o desaparición de la adherencia armadura - H, también a causa de la formación del óxido.²

MECANISMOS DE INICIO

Existen básicamente dos mecanismos de inicio:

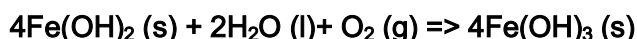
- disminución de la alcalinidad del H, ya sea por lixiviación con agua o por neutralización con CO₂ o ácidos.
- acción electroquímica de iones cloruro en presencia de oxígeno.

Para que exista corrosión es necesario: pH inferior a 8 en presencia de oxígeno y agua o pH mayor a 8 en presencia de oxígeno, agua e iones cloruro. En cambio, no se aprecia corrosión en ausencia de oxígeno, agua e/o iones cloruro, ni en presencia de iones hidróxido. Tampoco se aprecia si el potencial E sobre el acero es menor que cero, ni en presencia del ión Fe²⁺ e inhibidores.²

TIPOS DE CORROSIÓN

Localizada

- Picaduras: pueden ser causadas ya sea por disolución localizada de la película pasiva, o por el ingreso de iones cloruro al medio. El proceso comprende:
En el ánodo



Además se forman: Fe₂O₃, Fe₃O₄, Fe₂O₃·H₂O. Las reacciones son autocatalíticas.

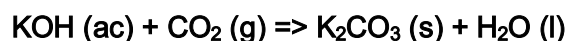
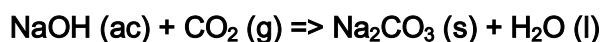
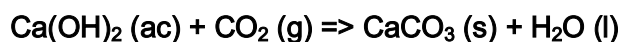
- Espacios confinados: espacio resguardado sin oxígeno continuo, con lo que da lugar a la formación de una celda diferencial de oxígeno. Las causas de este fenómeno son el rellenado de grietas con resinas epoxi, la utilización de

- revestimientos de resinas epoxi, y la presencia de iones cloruro, que potencian el proceso.
- Bajo tensión: ocurre cuando el HA está sometido a un medio agresivo junto con altos esfuerzos de tracción. Puede ser inducido por picaduras. Ocasiona pérdida de ductilidad y fractura de la armadura.
- Corrientes de Interferencia: son corrientes que no forman parte del circuito o celda específica. Estas pueden ser continuas o alternas, siendo el primer caso el más dañino. Son causadas en general por los sistemas de protección catódica, en medios de baja resistividad. Influyen la presencia de agua salobre, trenes, soldaduras y corrientes telúricas.

Uniforme - Generalizada

La pérdida de la película pasiva es producida por:

- carbonatación.
- presencia de iones cloruro.
- percolación y/o lavado con agua pura o ácida.
Las reacciones que ejemplifican el proceso son:



Para un pH mayor o igual a 12,5 o menor que 8.

Galvánica

Este tipo de corrosión ocurre en presencia de dos metales distintos. Un análogo a este caso se da cuando se daña la película de óxido. La zona dañada actúa como ánodo frente al resto (cátodo pasivado). También aparece este tipo de efecto cuando el refuerzo está en contacto con metales más nobles.²

FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE CORROSIÓN

Cabe destacar que existen diversos factores que afectan la estabilidad respecto a la corrosión para el HA:

- La presencia de agentes que neutralizan el medio alcalino.
- La ausencia de contacto Armadura - Hormigón.
- Dosificación- Cuanto mayor sea la compacidad y menor la porosidad, menor será la corrosión, y por tanto mayor la durabilidad. Importan: las características de los áridos, la cantidad de agua en la mezcla fresca, la relación agua / cemento, la influencia del grado de hidratación en la cantidad de poros, los aditivos.
- Compacidad- Es muy importante en cuanto a la penetración de agentes externos. Es inversamente proporcional a la porosidad.
- Homogeneidad.

- **Espesor del recubrimiento-** Es importante para garantizar la protección de la armadura. Este depende de la agresividad ambiental.
- **Humedad ambiental-** Es imprescindible para que ocurra corrosión en medios neutros o alcalinos. Además, es necesaria para que ocurra el movimiento de los iones a través del electrolito. En un H seco, la resistividad es muy elevada y no existe por tanto, corrosión. La cantidad de agua presente en el H es función de la humedad relativa ambiente. En condiciones cambiantes, es mayor la humedad del H que la ambiente, pues éste pierde agua a menor velocidad de lo que la gana. Esto ocasiona tensiones capilares. Este hecho se ve aumentado por la presencia de iones cloruro, a causa del carácter higroscópico de los mismos.
- **Oxígeno-** sin él no hay corrosión. Cuando los poros del H están saturados de agua, el O₂ tiene que disolverse antes de alcanzar la armadura. En estos casos, la velocidad de difusión del O₂ es el factor que controla de la corrosión. En H cuyos poros no están saturados, la velocidad de difusión del O₂ resulta suficiente.
- **Temperatura-** Influye de dos formas diferentes: si aumenta, la velocidad con que se mueven las moléculas también lo hace y entonces se incrementa la velocidad de corrosión, y viceversa. Además, si disminuye, se produce condensación de agua aumentando su concentración en el H.
- **Tensiones mecánicas-** La presencia de carbonatación, así como de agentes despasivantes (SCN⁻, S²⁻, Cl⁻) producen riesgo de corrosión bajo tensión.
- **Superficie del acero-** El acero cubierto por una capa de óxido (pasivado) resulta mucho menos reactivo.
- **Corrientes erráticas**
- **Contacto galvánico entre dos metales-** Constituye un riesgo en el caso de metales que polaricen en acero a potenciales más anódicos.
- **Iones despasivantes-** Son ejemplos Cl⁻, SO₄²⁻, SCN⁻, S²⁻. Estos intervienen en la degradación del H, dejando la armadura expuesta. Los más importantes son:

* Iones cloruro (Cl⁻): provocan la disolución de la capa pasiva, dando en general picaduras. Se encuentran en el H ya sea por estar presentes en el agua, el cemento, los áridos o en aditivos, o por penetración del medio exterior. Una vez en el H, se combinan con las fases alumínicas y ferríticas, o pueden también quedar libres. Estos son los que importan a los efectos de la corrosión.

En el caso de penetración desde el exterior, es importante conocer el tiempo en que llegarán a la armadura, la concentración mínima por encima de la cual se producirá despasivación, la velocidad de corrosión, y la profundidad de penetración. Es importante destacar que el espesor del recubrimiento debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar en el tiempo de vida útil de la estructura.

Esto puede calcularse como:

$$X_{Cl^-} = K_{Cl^-} (t)^{1/2}$$

Donde:

X_{Cl^-} es la profundidad de penetración de Cl^-

K_{Cl^-} es una constante que depende del HA y del medio

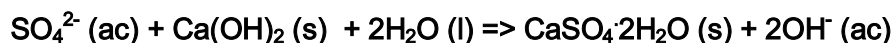
t es el tiempo

Es de destacar que la penetración de iones Cl^- no cumple rigurosamente la segunda ley de Fick.

* Iones Sulfato (SO_4^{2-}): están presentes en aguas industriales residuales como ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4) y en sales del subsuelo. Los sulfatos son perjudiciales para el cemento Pórtland. En general se encuentran en terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. Los más peligrosos son: $(NH_4)_2SO_4$, $CaSO_4$, $MgSO_4$, Na_2SO_4 . Los K_2SO_4 , $CuSO_4$, y $Al_2(SO_4)_3$, así como $Ba_2(SO_4)_3$ y $PbSO_4$ son insolubles y por lo tanto inofensivos.

Si hay SO_4^{2-} presente en el agua en contacto con el H, éste incrementa la solubilidad de los componentes de la pasta, lo que se denomina degradación por lixiviación. Además, se aprecia un intercambio de cationes, se forma $CaSO_4$ y se degrada el H por cambio iónico. Se produce degradación por expansión.

Otro efecto que puede provocar la presencia de SO_4^{2-} es la formación de yeso:



A su vez, en presencia de Mg:



El aluminato tricálcico del cemento, más el yeso y el hidróxido de calcio, producen la formación de sulfo-aluminato cálcico hidratado, sólido muy poco soluble (Etringita).

Este proceso, causa un aumento de volumen local, que termina en desmoronamiento.

- Carbonatación- El Dióxido de carbono (CO_2) reacciona con compuestos alcalinos y neutraliza el material. Se produce un cambio abrupto de pH, apareciendo un frente carbonatado, que se revela con fenolftaleína. Puede calcularse:

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} (t)^{1/2}$$

Donde:

X_{CO_2} es la profundidad de penetración de CO_2

K_{CO_2} es una constante del proceso

t es el tiempo

Si el frente llega a la armadura, esta se despasiva. La velocidad de avance de la carbonatación depende de:

* el contenido de agua, ya que sin agua no hay reacción, pero con los poros saturados la difusión es muy lenta.

* la porosidad, ya que cuanto mayor sea el número de poros y mayor el tamaño de los mismos, mayor es la carbonatación.

*la cantidad de materia alcalina (carbonatable) presente.

Una vez carbonatado, si la humedad relativa ambiente es menor del 80%, no hay despasivación apreciable. En cambio, para una humedad relativa mayor tiene lugar la corrosión.

Este tipo de ataque, puede dar lugar a la formación de capas de herrumbre protectoras, que disminuyen la velocidad de corrosión.

- Lixiviación por aguas blandas- Tienen a disolver el calcio de la estructura, reduciendo el contenido de CaO. También destruye los restantes componentes: silicatos, aluminatos y ferritas hidratadas. Esto ocasiona la pérdida de resistencia, que termina en desmoronamiento. El acero se corroe pues pierde la película pasiva. Las combinaciones citadas solo son estables mientras la concentración de Ca(OH)_2 en el agua del cemento se mantenga superior a cierto valor que recibe el nombre de concentración límite o umbral.
- Coqueras en contacto con armaduras- Zonas de coqueras interiores, donde la armadura es sometida a la elevada humedad del H pero sin alcalinidad, lo que resulta en la corrosión de las mismas.
- Fisuras- Transversales a la armadura, resultan un camino rápido para el ingreso de agentes agresivos. Longitudinales, resultan de un proceso de corrosión ya iniciado o de fallas constructivas. Esto produce una mayor expansión, y por tanto, son más agresivas. Obviamente, resulta de importancia el tamaño de la abertura.²

MÉTODOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Estos métodos, se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). Se han utilizado diversos métodos, comenzando por utilizar constituyentes de buena calidad y controlar sus propiedades fisicoquímicas. También se utilizan, pinturas, revestimientos del acero, recubrimientos sobre el H, protección catódica, inhibidores de corrosión, remoción de los iones cloruro, realcalinización del H.^{2, 6}

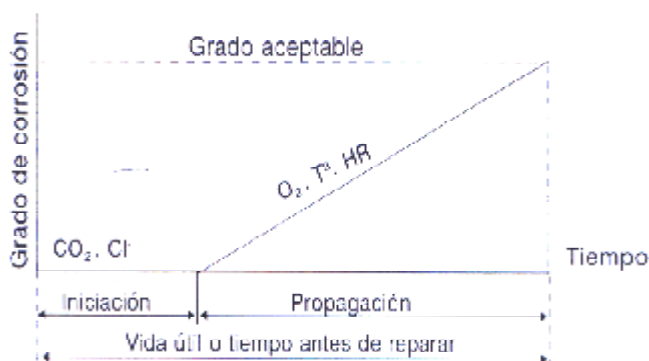
VIDA ÚTIL Y VIDA RESIDUAL

Se denomina vida útil al período en el cual la estructura conserva los requisitos del proyecto, en lo referente a seguridad, funcionalidad y estética. Existe un modelo, establecido por Tuutti, desarrollado específicamente para el caso de la corrosión de la armadura. Se distinguen básicamente dos períodos, como puede verse en la gráfica 1:

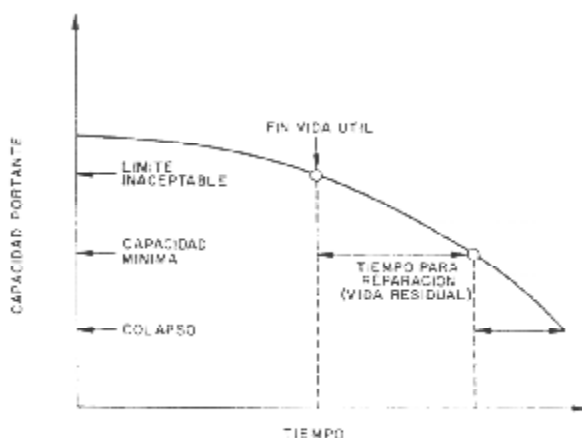
- Iniciación de la corrosión: tiempo que demoran los iones cloruro o la carbonatación en alcanzar la armadura y despasivarla.

- Propagación: la armadura se corroe libremente hasta llegar a un grado de deterioro inaceptable.

Se define como vida residual, el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza el límite inaceptable, lo cual se muestra en la gráfica 2. Es en esta etapa donde se suelen realizar reparaciones de la estructura.²



Gráfica 1
Modelo de vida útil de Tuutti.



Gráfica 2
Modelo de vida residual

Objetivos

El presente trabajo intenta realizar un acercamiento al estudio y evaluación de la Corrosión del Hormigón Armado, trabajando en lo concerniente a la aplicación de las diferentes técnicas químicas existentes y en su adaptación a la realidad uruguaya.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Se realiza la implementación de técnicas de monitoreo de la Corrosión del Hormigón Armado (HA), estudiándose a modo de ejemplo una estructura de nuestra

capital: el puente peatonal situado sobre la Av. Cachón, de 55 años de edad, en la cual existen signos de corrosión como son: la presencia de óxidos, que se distinguen como manchas marrones y la delaminación de vigas, con acero expuesto. Estos daños, se encuentran distribuidos de forma relativamente homogénea por la estructura, aunque se evidencia mayor deterioro en la parte inferior del puente. Cabe destacar, que dicha estructura se encuentra ubicada en una zona urbana, expuesta al smogg y al ruido, en una atmósfera de humedad relativa alta, promedio entre 75 y 77 % y régimen de vientos fuertes. Se encuentra cercana a la costa, por lo que está expuesta al ataque por iones cloruro. Por último, se señala que se cuenta con los planos de la estructura, por lo que se conocen datos acerca de la posición y tamaño de las armaduras.

Toma de muestra

La extracción de muestras debe ser representativa del estado de toda la estructura, por lo que se realiza muestreo en las diferentes zonas de la misma. Se extraen en total 5 testigos cilíndricos, de los cuales 2 poseen 10 cm. de diámetro, y los restantes 5 cm de diámetro. Para realizar las extracciones se utilizan brocas de diamante de los diámetros mencionados y taladros especiales, eléctricos o a combustión.

Las probetas extraídas, según las diferentes secciones del puente son:

Testigo N°	Lugar de extracción	Diámetro aprox. (cm)	Ensayo a realizar
(1)	Lateral hacia Positos	5	Resistividad
(2)	Lateral hacia el centro	5	Porosidad
(3)	Piso a la derecha	5	Carbonatación
(4)	Piso a la derecha	10	Concentración de iones cloruro
(5)	Piso a la izquierda	10	Resistencia a la compresión

Realización de ensayos

Dentro de los ensayos posibles para analizar el estado de una estructura de HA respecto a su corrosión, se encuentran:

- **Medida del espesor del recubrimiento de Hormigón**
- **Medida de la Resistividad Eléctrica.**
- Ultrasonido.
- Esclerometría.
- **Medida de la profundidad de carbonatación.**
- **Determinación de la concentración de iones cloruro.**
- **Determinación de la Resistencia a la Compresión.**
- **Determinación de Porosidad y Absorción de Agua.**
- Determinación de profundidad y localización de la armadura.

- Determinación de potenciales.
- Determinación de la Velocidad de Corrosión.²

De todos ellos, solo se realizan en este caso los ensayos remarcados, dado que, con ellos se puede a priori establecer un diagnóstico sobre la estructura.

Medida del espesor del recubrimiento de Hormigón

MATERIALES

- Regla milimetrada

TÉCNICA

Se mide la distancia a la armadura desde los dos extremos del testigo. Se registran los valores.

Medida de la Resistividad Eléctrica²

REACTIVOS

- NH₄OH conc.
- Polvo de Cgrafito

MATERIALES

- Voltímetro de alta impedancia *Advantest R8340A*, Ultra High Resistance Meter
- Electrodos cilíndricos de cobre
- Pincel

TECNICA

- Tomar las dimensiones del testigo (cilíndrico).
- Preparar una pasta símil Aquadag[®]E²⁴ (Pasta de grafito conductora de la corriente eléctrica que se utiliza para lograr un contacto homogéneo testigo – electrodo) utilizando Cgrafito y la cantidad necesaria de NH₄OH conc. para obtener una pasta fluida. Pintar las caras planas del testigo con la pasta preparada en el punto anterior.
- Pintar los también la cara interior de los electrodos y adherirlos a las caras anteriormente pintadas. Dejar secar. De esta forma se obtiene un contacto óptimo entre los electrodos y el testigo.
- Medir la resistencia.
- Calcular:

$$\rho = R (A / L)$$

Donde:

ρ es la resistividad en $\Omega \cdot m$

R es la resistencia en Ω

A es el área de la base del testigo en m²

L es el largo el testigo en m

Se toma que para una resistividad mayor a 200 kΩcm el riesgo de corrosión es poco, entre 200 y 10 kΩcm el riesgo es alto.

Medida de la profundidad de carbonatación²

REACTIVOS.

•Solución de fenolftaleína preparada pesando 1,0 g de fenolftaleína y disolviéndolos en 49,0g de EtOH y 50,0 g de agua destilada.

MATERIALES

- Sierra con disco de diamante
- Atomizador

TÉCNICA

- Cortar un testigo transversalmente.
- Eliminar el polvo de la superficie.
- Inmediatamente aplicar el indicador atomizándolo sobre toda la superficie.
- Medir la profundidad de la zona incolora, que corresponde a la zona de pH < 8, es decir, a la zona carbonatada.
- Calcular:

$$KCO_2 = XCO_2 / (t)^{1/2}$$

$$tar = (ec / KCO_2)^2$$

Donde:

tar es el tiempo que demora en llegar la carbonatación a la armadura
ec es la profundidad del acero de refuerzo

Determinación de la concentración de iones cloruro²

REACTIVOS

- HNO₃ (1+1)
- H₂O₂ 30 %
- Solución de anaranjado de metilo
- FeNH₄(SO₄)₂·12H₂O
- NH₄OH (28,5 %)
- H₂O destilada

MATERIALES

- Sierra con disco de diamante
- Molino Carlowitz & Co.
- Balanza con apreciación al miligramo

- Agitador magnético
- Material de vidrio variado
- Papel de filtro

TÉCNICA

- Cortar el testigo cilíndrico en porciones de aproximadamente 10 mm de espesor, manteniéndolas numeradas y separadas, para su correcta identificación.
- Moler cada una de las porciones y tamizar, quedándose con la porción que pasa el tamiz ASTM N° 20.

Determinación de la concentración total de iones cloruro²⁵

Mediante este procedimiento se determina la concentración de iones cloruro totales: los presentes en la masa de H combinados con las fases del cemento, principalmente en el aluminato tricálcico, así como los libres, que penetran por difusión desde el exterior.

- Pesar 5g de muestra con precisión al miligramo y colocarlos en un matraz Erlenmeyer.
- Dispersar en 38 mL de agua destilada.
- Agregar lentamente 12,5 mL de HNO₃ (1+1) y agitar.
- Agregar, si se percibe olor a H₂S, 3 mL de H₂O₂ 30 %.
- Añadir 2 gotas de solución de anaranjado de metilo, cubrir y dejar reposar unos minutos.
- Si la solución no es rosada, agregar HNO₃ (1+1) gota a gota, con agitación hasta color rosado o rojo persistente y añadir 10 gotas más.
- Calentar a ebullición y remover inmediatamente de la fuente de calor. Dejar enfriar y filtrar por papel.
- Lavar con 3 porciones de agua destilada. Transferir el filtrado a un matraz aforado de 100,00 mL y completar con agua destilada hasta enrasar.

Repetir el procedimiento para cada una de las porciones. Realizar además un blanco. Determinar la concentración de iones cloruro para cada una de las soluciones.

Determinación de la concentración de iones cloruro solubles²⁶

Mediante este procedimiento se determina la concentración de iones cloruro solubles en agua, es decir, aquellos que han penetrado por difusión en los poros del H y se encuentran libres.

- Pesar 30 g de muestra y colocarlos en un matraz Erlenmeyer.
- Agregar 48 mL de agua destilada, 2 mL de FeNH₄(SO₄)₂·12H₂O 100 g/L y 0,3 mL de NH₄OH.
- Agitar durante 22 horas. Filtrar por papel y transferir el filtrado a un matraz aforado de 100,00 mL. Completar con agua destilada hasta enrasar.

Repetir el procedimiento para cada una de las porciones. Realizar además un blanco. Determinar la concentración de iones cloruro para cada una de las soluciones.

Calcular:

$$KCl = XCl / (t)^{1/2}$$

$$tar = (ec / KCl)^2$$

Donde:

tar es el tiempo que demoran en llegar los iones cloruro a la armadura

ec es la profundidad del acero de refuerzo

Nota

La determinación de la concentración de iones cloruro es realizada en ambos casos por el Departamento de Aguas y productos Químicos del LATU, según la norma ISO 10304 /1 – 1992.

Se toma como límite para la concentración de iones cloruro 0,2 % para el H pretensado y postensado y 0,4 % para el HA.

Determinación de la Resistencia a la Compresión¹⁹⁻²⁰

REACTIVOS

- Cgrafito
- Azufre
- Arena

MATERIALES

- Calentador
- Plancha calefactora
- Plato
- Prensa Tecnotest

TÉCNICA

- Medir diámetro y altura del testigo previamente emparejado en sus extremos para obtener superficies relativamente planas. Este debe cumplir que $h / d \geq 1$.
- Calcular el área de las caras.
- Encabezar las mismas utilizando mortero de azufre, según la norma correspondiente.²⁰
- Medir la resistencia a la compresión en la prensa, según la norma correspondiente.¹⁹

Se toma que si la resistencia a la compresión es mayor de 45 MPa, el H es de alta resistencia y por tanto durable. Si, en cambio, la resistencia es menor de 20 MPa, el H es de baja durabilidad.

Determinación de Porosidad y Absorción de Agua^{2, 27}

MATERIALES

- Estufa
- Cubeta de fondo plano con tapa
- Esponja plana
- Balanza analítica Sartorius
- Balanza Mettler PM 34-K Deltarange con dispositivo para determinar masa del espécimen sumergido

TÉCNICA

Absorción Capilar

- Cortar especímenes de $h \leq 50$ mm.
- Secarlos a 50 °C por 48 horas y enfriar en desecador.
- Registrar su masa m_0 .
- Colocar sobre esponja húmeda, en una cubeta de fondo plano cuidando que el nivel de agua no pase los 3 mm de la parte inferior. Tapar.
- Registrar la masa a intervalos de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 24 y 48 horas.

Calcular:

$$m = th / h^2$$

$$S = (m)^{-1/2}$$

Se calcula el coeficiente de absorción capilar, K, como la pendiente del tramo lineal del gráfico $(m_t - m_0) / A$ vs. $(t)^{1/2}$. Luego se calcula:

$$Ee = [K (m)^{1/2}] / 1000$$

Donde:

m es la resistencia a la penetración

S es la sorción capilar

H es la altura de los testigos

Ee es el espesor mínimo de recubrimiento efectivo

Absorción de agua

- Secar los especímenes anteriores por 72 horas a 105 °C, o hasta peso constante. Dejar enfriar en desecador.
- Pesar cada testigo (m_0) y sumergir en agua con un nivel de 25 mm por encima de la probeta. Dejar 30 minutos.
- Secar el exterior y pesar (m_f).

Calcular:

$$\%abs\ agua = [(m_f - m_0)100] / m_0$$

Porosidad

Sumergir los especímenes anteriores en agua durante 24 horas mínimo.

Registrar la masa de cada espécimen saturado de agua.

Registrar la masa de cada espécimen dentro del agua.

Calcular:

$$\% \text{porosidad } T = [(m_{\text{sat}} - m_{105^{\circ}\text{C}}) 100] / (m_{\text{sat}} - m_{\text{sumergido}})$$

Se acepta $S \leq 6 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$) en medios poco severos, para espesores de 30 mm de H. Si el espesor varía S cambia proporcionalmente. Para el porcentaje de porosidad, se toma que: si es menor ó igual al 10 % el H es de buena calidad y compacidad, si está entre 10 y 15 % es de moderada calidad y si es mayor al 15 % es de durabilidad inadecuada.

Nota

Cabe destacar que en todos los ensayos planteados los límites de aceptación son sugeridos, pero no inamovibles. Las propiedades varían mucho de un H a otro, y por tanto las condiciones que los afectan. Los rangos y límites presentados son sugeridos, pero depende finalmente del técnico evaluador aceptar o no al H como de buena calidad, considerando el estado de todas las variables en conjunto y no aisladas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medida del espesor del recubrimiento de Hormigón

Se mide en los distintos testigos obtenidos determinándose que el espesor mínimo de recubrimiento es de **23 mm** hasta la armadura. El espesor máximo es de **40 mm**.

Profundidad de Carbonatación

Se utiliza para la mencionada determinación un testigo de 50 mm de diámetro y 87 mm de altura, en el cual se verifica la presencia de armadura a 37 mm de un extremo y 45 mm del otro. Se obtienen los siguientes resultados, que se muestran en las figuras 4.1 y 4.2 :

- Se observa que el frente de carbonatación es de 5 mm en un extremo y de 10 mm en el otro.
- Se observa un sector carbonatado en el centro del testigo, que coincide con la posición de la armadura.



Fig. 9
Testigo carbonatado atomizado con fenolftaleína. Vista exterior.



Fig. 10
Testigo carbonatado atomizado con fenolftaleína. Vista interior.

- Para el frente de 5 mm-
 $KCO_2 = 0,674 \text{ mm (año)}^{-1/2}$ tar = 4,46 exp 3 años
- Para el frente de 10 mm-
 $KCO_2 = 1,34 \text{ mm (año)}^{-1/2}$ tar = 753 años

Esto significa que, en principio, no existe riesgo de corrosión para la estructura en el período de tiempo de vida útil esperada. Sin embargo, se observó la presencia de una zona carbonatada en el segmento donde se encuentra posicionada la armadura, lo que significa un riesgo importante, con alta probabilidad de corrosión por carbonatación.

Son una incógnita las circunstancias que han producido la carbonatación de dicho sector. Pueden aventurarse posibles hipótesis, como son la presencia de fisuras cercanas a la zona de extracción del testigo por las cuales el sector de la armadura tuviera contacto con el aire, o también la posibilidad de un defecto en la fabricación, donde se carbonatase el sector de la armadura por exposición al aire, antes de completada la estructura.

Resistencia a la compresión

Se miden primero las dimensiones del testigo que se muestra en la figura 4.3:



Fig. 11
Testigo encabezado con mortero de azufre, para ensayar Resistencia a la Compresión.

$D_{\text{paralelo}} = 9,2 \text{ cm}$

$D_{\text{perpendicular}} = 9,2 \text{ cm}$

$D_{\text{promedio}} = 9,2 \text{ cm}$

$h = 9,0 \text{ cm}$

$h / D = 0,98$ Factor de corrección = 0,87

Se determina la resistencia a la compresión:

$R = 463,97 \sim 45,50 \text{ Mpa}$

$R_{\text{corr}} = 39,58 \text{ Mpa}$

El tipo de rotura obtenido es la definida por la norma ASTM C 39 / C 39M-05 como tipo 1, mostrada en la figura 4.4, la cual consiste en una rotura cónica doble.

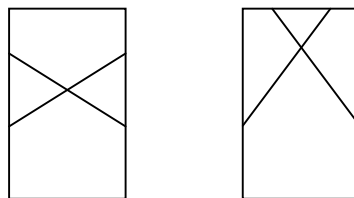


Fig. 12
Tipos de Rotura cónica doble, según Norma ASTM C 39 / C 39M – 05.

De los datos se extrae que el H es de buena calidad.

Medida de la concentración de iones cloruro

Uno de los testigos de 100 mm de diámetro se divide en 5 porciones de aproximadamente 10 mm de espesor, numeradas del 1 al 5 de un extremo al otro, según se muestra:

Porción	Espesor (mm)
1	12
2	26
3	12
4	13
5	12

Es de destacar que la porción 2 es de mayor espesor pues en esta franja se encuentran las armaduras. Por ello, es imposible en las condiciones experimentales con las que se cuenta, realizar el tratamiento de muestra para la misma, y así la medición de la concentración de iones cloruro.

Determinación de la concentración total de iones cloruro

Se pesa para las diferentes porciones:

Porción	m (g)
1	5,026
3	5,012
4	5,063
5	5,069

Al realizar el tratamiento de muestra, se observa en las porciones 1 y 5 (las más externas) burbujeo al añadir el HNO₃ (1+1). Este puede deberse a la presencia de carbonatación en dichas secciones, ya que, los carbonatos presentes reaccionan con el ácido para dar ácido carbónico, el cual se descompone liberando CO₂.



Los resultados de la determinación de iones Cl⁻ realizada son los siguientes:

Porción	Conc. en sol. (mg/L)	Conc. (% m/m)
1	4,2	8,36 exp -3
3	1,1	2,19 exp -3
4	<0,6	<1,19 exp -3
5	<0,6	<1,18 exp -3
Blanco	No detectable	No detectable

Determinación de la concentración de iones cloruro solubles

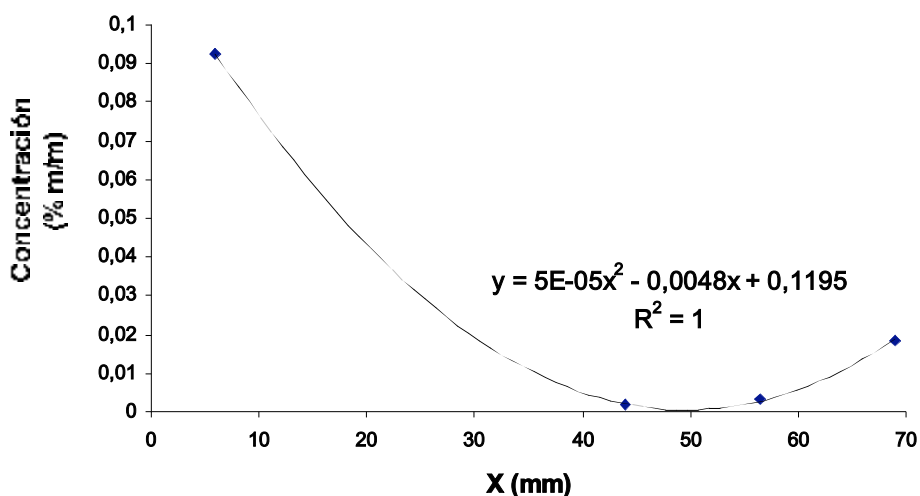
Se pesa para las diferentes porciones:

Porción	m (g)
1	30,042
3	30,030
4	30,049
5	30,089

Los resultado obtenidos de la determinación de iones Cl⁻ muestran un marcado perfil de penetración desde el exterior, según se aprecia en la gráfica 4.1. Los datos ajustan perfectamente a un polinomio de segundo grado, cuya ecuación se muestra.

Porción	Conc. en sol. (mg/L)	Conc. (% m/m)
1	279	9,25 exp -2
3	6,5	1,80 exp -3
4	10,5	3,13 exp -3
5	57,2	1,86 exp -2
Blanco	1,1	/

Gráfica 3: Perfil de penetración de iones cloruro



Al analizar ambas medidas de la concentración de iones cloruro, surgen varios aspectos a considerar. Primeramente, se resalta que al contrario de lo esperado, las concentraciones de iones cloruro totales son menores que las obtenidas para los cloruros solubles en agua, es decir, los iones que han penetrado desde el exterior por difusión. Es de destacar que la concentración total de cloruros debería ser igual o mayor que la debida a la penetración. Esta incoherencia puede deberse a una digestión de la muestra no del todo adecuada, ya que, la presencia de carbonatación señalada anteriormente pudo haber interferido. Por lo tanto, los datos para la concentración total de iones cloruro no se consideran representativos de la muestra en cuestión.

Para la concentración de iones cloruro solubles, se evidencia que existe una mayor penetración de iones cloruro desde uno de los extremos de la estructura que desde el otro. Igualmente, desde ambos lados se constata la presencia de difusión desde el exterior. La zona cercana a la amadura, posee una concentración de cloruros apreciable. Así, no tiene mucho sentido calcular el tiempo de penetración hasta el refuerzo, ya que existe evidencia de la presencia de cloruros en esta

porción. Sin embargo, la concentración es moderada, no siendo preocupante por ahora, pues está bastante debajo del límite establecido.

Por último, vale la pena destacar que al contarse con una penetración de iones cloruro que alcanza la armadura, debe prestarse especial atención a este punto en el futuro, dado al riesgo potencial de corrosión que implica para la estructura.

Medida de resistividad

De uno de los testigos, se cortan dos trozos con las bases bien parejas y paralelas entre si. Se determinan sus dimensiones:

Trozo	D (cm)	h (cm)	A (cm ²)
A	4,5	4,5	15,9
B	4,5	4,5	15,9

Se mide la resistividad en los testigos encabezados con aquadag®E:

Trozo	R (Ω)	ρ (Ω cm)
A	1,2 exp 8	4,77 exp 8
B	1,5 exp 8	5,30 exp 8

$$\rho_{prom} = 4,77 \text{ exp } 8 \text{ } \Omega \text{ cm} \sim 4,77 \text{ exp } 6 \text{ } \Omega \text{ m}$$

Estos resultados implican un riesgo muy bajo o hasta nulo de corrosión de la armadura, visto desde el punto de vista del transporte de iones para la conducción de la corriente eléctrica en el H.

Determinación de porosidad y absorción de agua

Se corta uno de los testigos extraído en porciones de las siguientes dimensiones:

Probeta	D (cm)	h (cm)
A	4,5	4,2
B	4,5	4,2
C	4,5	3,8
D	4,5	3,8

Absorción Capilar

Se obtienen los siguientes resultados:

t (s) \ m (g)	A	B	C	D
0	161,40	162,20	153,04	147,58
300	162,73	163,01	153,70	148,87
600	162,91	163,15	153,86	149,00
900	163,14	163,28	154,00	149,16
1800	163,45	163,52	154,13	149,47
3600	164,01	163,91	154,44	150,01
7200	164,57	164,26	154,91	150,56
10800	165,09	164,53	155,14	150,99
86400	167,03	167,21	156,94	153,94
172800	167,17	167,85	157,78	154,05

Además se observa que el tiempo que demora el frente de agua absorbida en llegar a la cara superior de la probeta es:

Probeta	t (s)
A	93600
B	93600
C	172800
D	172800

Con estos datos se calculan **m** y **s**:

$$m_A = 5,3 \exp 7 \text{ s/m}^2 \quad S_A = 1,37 \exp -4 \text{ m/s}^{1/2}$$

$$m_B = 5,3 \exp 7 \text{ s/m}^2 \quad S_B = 1,37 \exp -4 \text{ m/s}^{1/2}$$

$$m_C = 1,2 \exp 8 \text{ s/m}^2 \quad S_C = 9,18 \exp -5 \text{ m/s}^{1/2}$$

$$m_D = 1,2 \exp 8 \text{ s/m}^2 \quad S_D = 9,18 \exp -5 \text{ m/s}^{1/2}$$

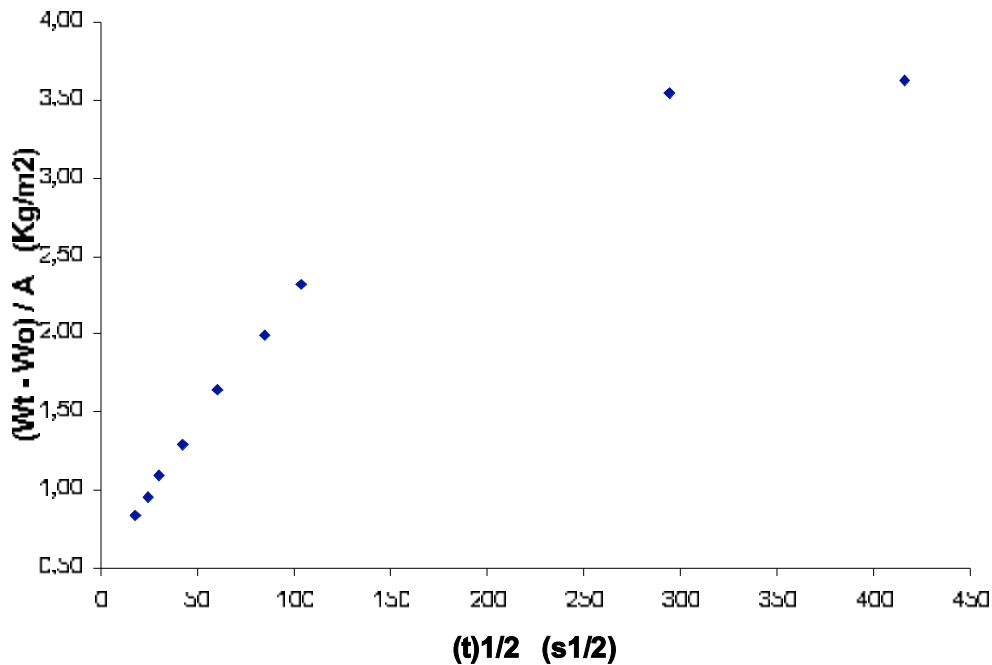
De esto se desprende que:

$$m_{prom} = 8,7 \exp 7 \text{ s/m}^2 \quad S_{prom} = 1,14 \exp -4 \text{ m/s}^{1/2}$$

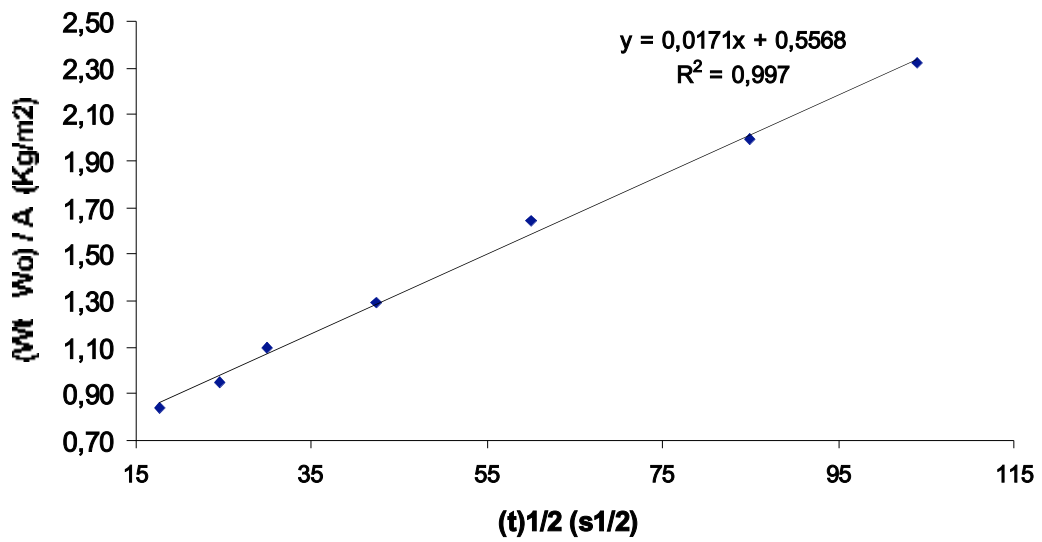
El valor de la sorción capilar se encuentra en el límite de aceptación, lo que implica en principio un riesgo para la estructura de HA, ya que, recordemos que los límites citados son solo tentativos. Este valor por si solo no implica demasiado, pero puede ser de vital importancia sumado a otros factores de riesgo.

Además, se grafica $(W_t - W_0) / A$ vs. $(t)^{1/2}$, para los cuatro casos, como se muestra en las gráficas 4, 6, 8 y 10. Se determina también en cada caso, el mejor ajuste para el tramo recto de la curva, lo cual se aprecia en las gráficas 5, 7, 9 y 11.

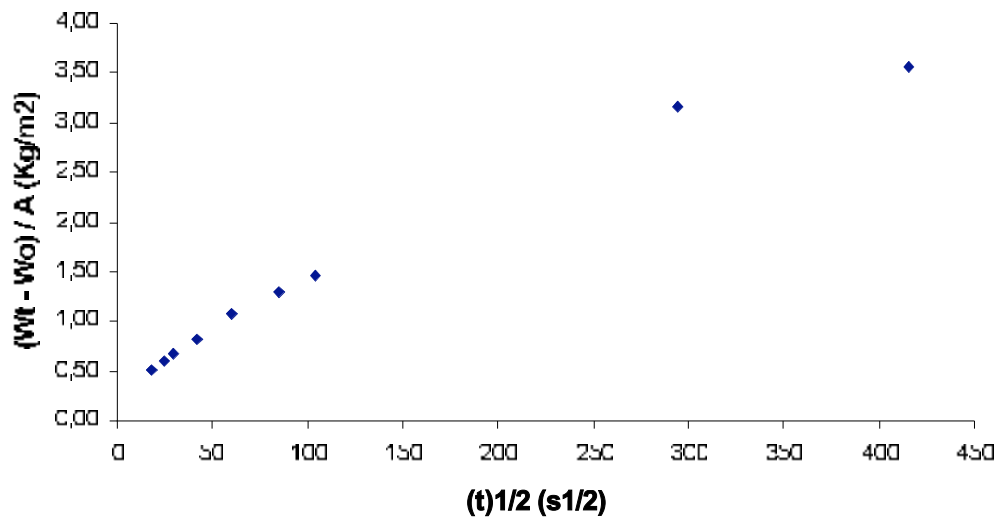
Gráfica 4: $(W_t - W_0) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para A



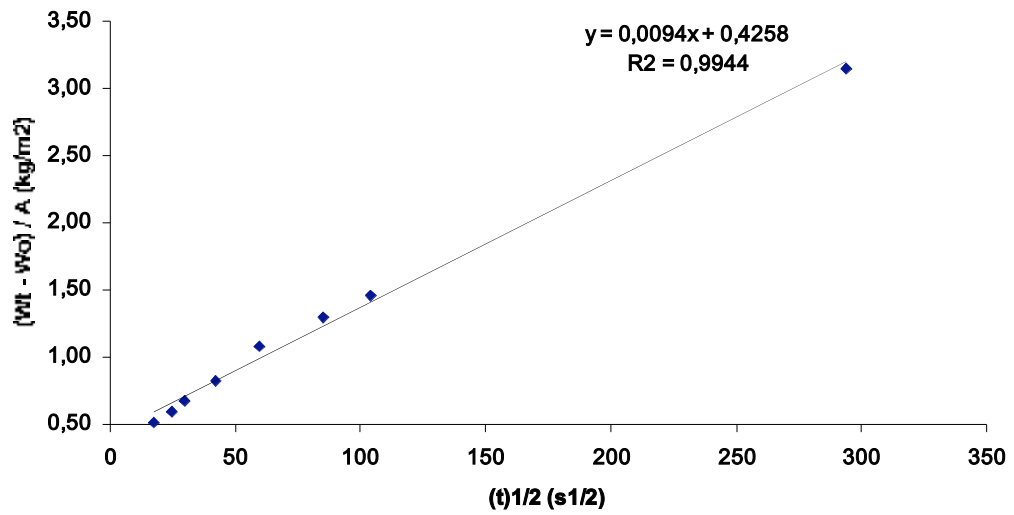
Gráfica 5: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para A



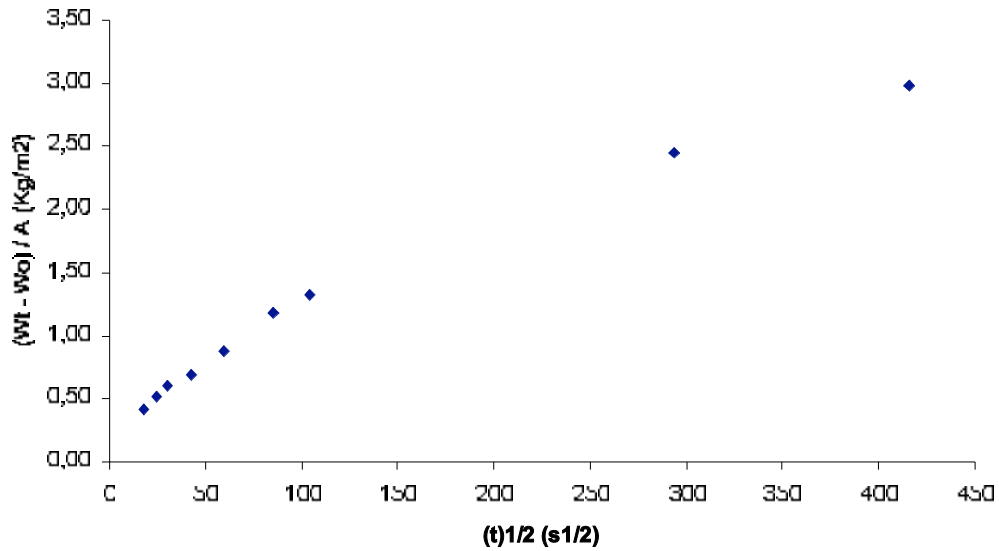
Gráfica 6: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para B



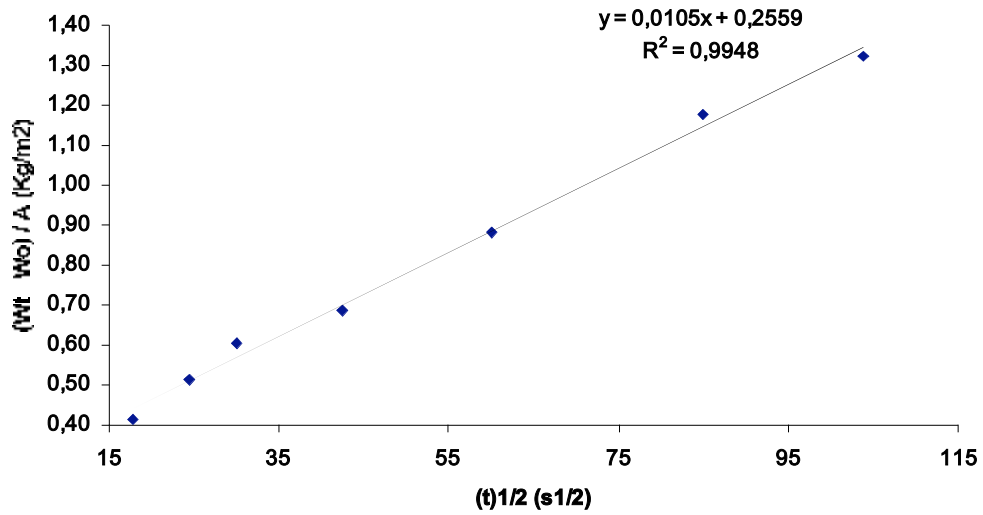
Gráfica 7: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para B



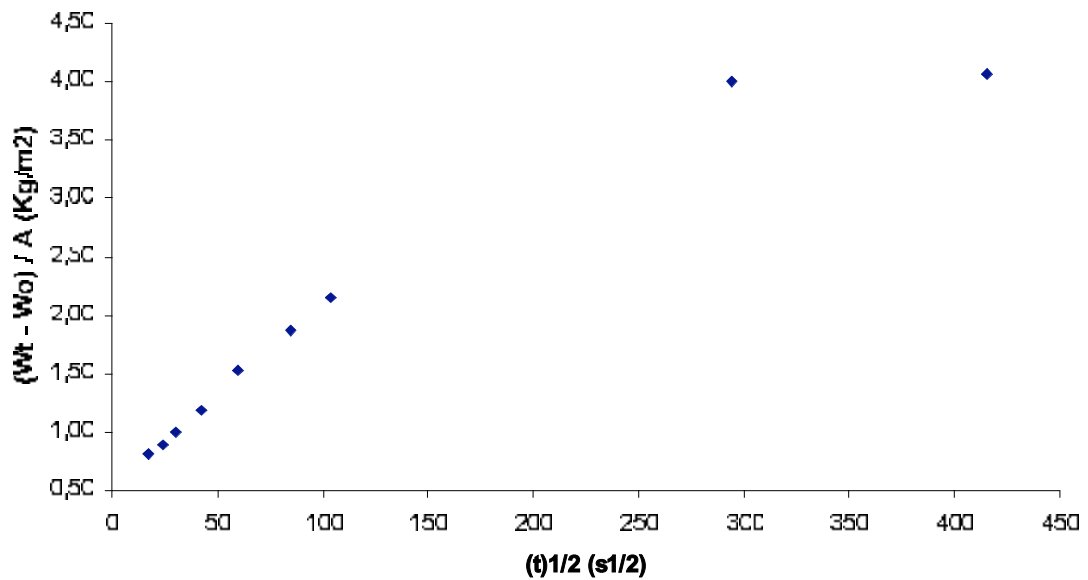
Gráfica 8: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para C



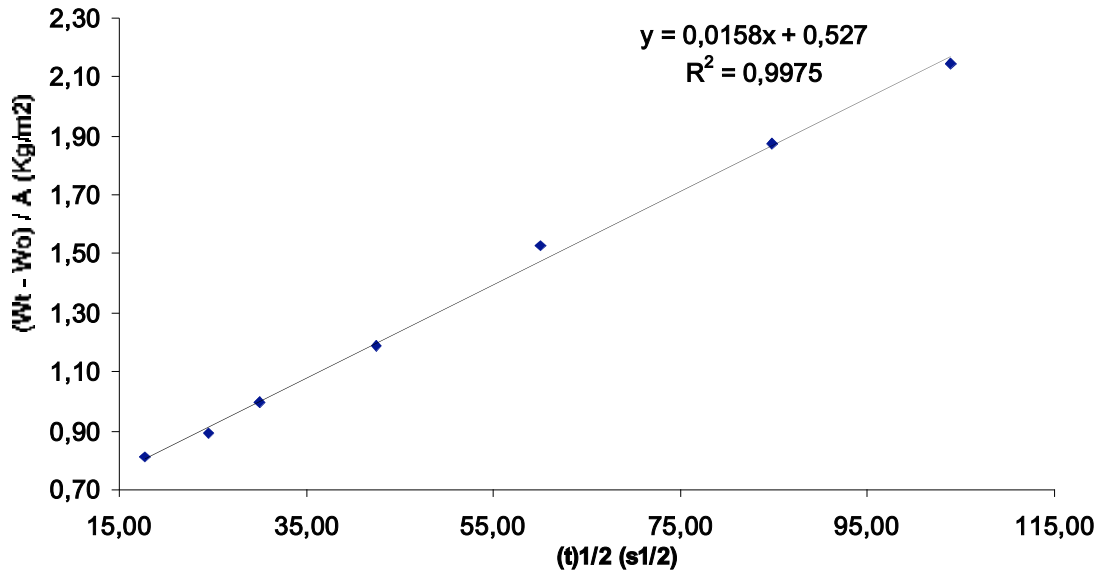
Gráfica 9: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para C



Gráfica 10: $(W_t - W_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para D



Gráfica 11: $(w_t - w_o) / A$ vs. $(t)^{1/2}$ para D



En todos los casos se observa el comportamiento esperado para la absorción de agua. Además, de la pendiente de la curva se extraen los valores de K:

Probeta	K (kg/m ² s ^{1/2})
A	0,0171
B	0,00942
C	0,0105
D	0,0158

A partir de dichos valores se calculan los valores de Ee, para cada espécimen, y el promedio:

$$Ee_A = 0,12 \text{ g/m}^3$$

$$Ee_B = 0,068 \text{ g/m}^3$$

$$Ee_C = 0,12 \text{ g/m}^3$$

$$Ee_D = 0,17 \text{ g/m}^3$$

Si se realiza un promedio de los datos, se obtiene:

$$E_{\text{prom}} = 0,1203 \text{ g/m}^3$$

Absorción de agua y Porosidad

Se determinan las masas de los especímenes secos por 72 horas a 105 °C (m_0), las masas luego de sumergidos 30 min (m_f), la masa luego de sumergidos 48 horas donde el H ya está saturado de agua (m_{sat}) y las masas sumergidos en agua (m_{sum}):

Probeta	m_0 (g)	m_f (g)	m_{sat} (g)	m_{sum} (g)
A	157,88	166,11	166,96	96,6
B	157,70	166,11	167,56	97,0
C	149,38	155,45	157,58	96,1
D	143,80	153,08	153,88	92,2

Nota: La m_{sum} posee una menor cantidad de cifras significativas, pues para realizar la medida de la masa sumergida se cuenta con una balanza con apreciación en la décima de gramo.

A partir de los resultados se calcula:

Probeta	Agua absorbida (%)	porosidad total (%)
A	5,2	13
B	5,3	14
C	4,1	13
D	6,5	16

$$\text{Porosidad } T_{\text{promedio}} = 14 \%$$

De acuerdo al porcentaje de porosidad total, el H es de moderada a baja calidad, encontrándose en el límite de aceptación, por lo que su durabilidad podría resultar inadecuada.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de los diferentes análisis realizados, se puede establecer un diagnóstico para la estructura de Hormigón Armado en estudio.

La alta resistividad medida implica por si sola para el Hormigón Armado una baja potencialidad corrosiva. En cambio, la presencia de carbonatación, junto con la humedad relativa alta que caracteriza a Montevideo, implican un riesgo moderado de corrosión.

Es de destacar que el Hormigón de la estructura es de buena calidad, lo que se desprende de la alta resistencia a la compresión que posee. Asimismo, el espesor del recubrimiento de la armadura es adecuado. Sin embargo, la porosidad elevada genera un riesgo moderado de corrosión, disminuyendo la calidad del Hormigón mencionado.

En cuanto a los iones cloruro, se aprecia difusión desde el exterior, pero la concentración alcanzada en contacto con las armaduras es baja y por lo tanto no supone un riesgo elevado de corrosión. Igualmente, no es un punto a descartar y debe ser monitoreado adecuadamente en el futuro.

Hasta aquí, el riesgo de corrosión que se aprecia en la estructura es moderado. Pero sin embargo, al observar la carbonatación, se encuentra que esta ha llegado hasta la armadura, lo que produce el despasivado del acero de refuerzo. Así, el riesgo de corrosión desde ese punto de vista es alto.

En conclusión, el riesgo de corrosión para la estructura en estudio es elevado. Seguramente el estado exterior deteriorado observado sea causa de dicho fenómeno. Por ello, se recomienda la toma de acciones para enlentecer el mencionado proceso o reparar los daños ocasionados.

BIBLIOGRAFÍA

1. SIC - LATU, *Folleto Explicativo*, Montevideo, Uruguay.
2. Trocónis de Rincón, O.; Romero de Carruyo, A.; Andrade, C.; Helene, P.; Díaz, I.; *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de Hormigón Armado*, DURAR, CYTED, 3° ed, MERCOSUR, 2000.
3. Orús, F.; *Materiales de construcción*, Ed. Dossat, 7° ed., Madrid, España, 1984.
4. Galabru, P.; *Tratado de procedimientos generales de construcción, Obras de fábrica y metálicas*, Ed. Reverté, Barcelona, España, 1973.
5. O' Reilly Díaz, V.; *Métodos para dosificar mezclas de Hormigón*, Ed. Artes gráficas Sagitario, La Paz, Bolivia, 1997.

6. Helene, P.; Pereira, F; *Manual de rehabilitación de estructuras de Hormigón armado, reparación, refuerzo y protección*, Rehabilitar, CYTED, Ed. Bandeirantes ind. Gráfica, SP, Brasil, **2003**.
7. Norma UNIT 1052:99, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Membranas de asfalto oxidado plástico con armadura central de polietileno*.
8. Norma UNIT 1053:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Preparación de probetas y determinación de la masa por metro cuadrado y espesor*.
9. Norma UNIT 1054:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Determinación de las masas de los componentes*.
10. Norma UNIT 1055:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Ensayo de plegado*.
11. Norma UNIT 1056:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Determinación de la resistencia al calor*.
12. Norma UNIT 1057:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Determinación de la resistencia a la tracción*.
13. Norma UNIT 1058:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Membranas de asfalto oxidado plástico con armadura central de polietileno y revestimiento de lámina de aluminio*.
14. Norma UNIT 1059:2000, *Productos asfálticos para cubiertas - Membranas preelaboradas - Membranas de asfalto oxidado plástico con armadura central de polietileno y revestimiento geotextil*.
15. Norma UNIT 563 – 80, *Norma para materiales de lucha contra incendios: extintores portátiles - extintores a espuma química, métodos de ensayo*.
16. Norma UNIT 564 – 80, *Norma para materiales de lucha contra incendios: extintores portátiles - extintores a espuma química, métodos de ensayo*.
17. Norma UNIT 586 – 80, *Norma para materiales de lucha contra incendios: extintores portátiles, extintor manual a dióxido de carbono*.
18. Norma UNIT 600 – 81, *Norma para materiales de lucha contra incendios: extintores manuales a base de polvo con cilindro de gas y salida libre*.
19. Norma ASTM C 39 / C 39M – 05, *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.

20. Norma ASTM C 617 – 98, *Standard practice for capping cylindrical concrete specimens.*
21. Norma ASTM C 1231 / C1231M – 00, *Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders.*
22. Norma ASTM C 31 / C 31M – 03a, *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field.*
23. www.meteorologia.com.uy/caract_climat.htm, Dirección Nacional de Meteorología, consultada 10.02.06.
24. Aquadag®E, *product Data Sheet*, Acherson Colloids Company, Port Huron, EE.UU.
25. Norma ASTM C 1152 / C 1152M – 04, *Standard method for acid-soluble chloride in mortar and concrete.*
26. Norma ASTM D 1411 – 04, *Standard test methods for water-soluble chlorides present as admixtures in graded aggregate road mixes.*
27. Norma ASTM C 642 – 90, *Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete.*

