



**HORMIGÓN ARMADO: DURABILIDAD. MEDIDAS DE POTENCIALES DE
CORROSIÓN COMO ELEMENTO DE CONTROL DEL ESTADO DE LAS ARMADURAS**

Memòria del Projecte Fi de Carrera
d'Enginyeria de Materials
realitzat per
Miguel José Olea Arranz

i dirigit per
Josep Maria Pallarés Martinez

Bellaterra 2 de febrero de 2011

El abajo firmante, Josep María Pallarés Martínez, Ingeniero de caminos canales y puertos y Director de Red GenCat, en calidad de tutor externo del proyecto de fin de carrera en Ingeniería de Materiales con título: "Hormigón armado: Durabilidad. Medidas de potenciales de corrosión como elemento de control del estado de las armaduras".

Certifica, que ha sido realizado con aprovechamiento y dedicación por Miguel Olea Arranz, en las instalaciones de A.C.E.S.A y que constituye su proyecto de fin de carrera en Ingeniería de Materiales.

Para dejar constancia de ello se firma el presente certificado en Granollers, 28 de enero de 2011.



acesa
abertis
Autopistas, Concesionaria Española, S.A. (Unipersonal)
Av. Parc Logístic, 12-20 08040 Barcelona

Josep Maria Pallarés Martínez

Director Red Gencat

Els sotasignats, .

Dr. José Antonio Ayllón Esteve

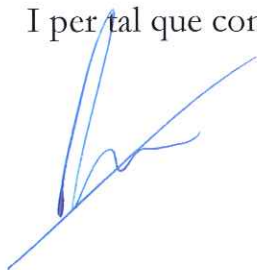
Dr. Pau Solsona Mateos.

Professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFIQUEN:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva tutoria per en Miguel Olea Arranz

I per tal que consti firma la present.



Signat:

Bellaterra,2....de.....febrer.....de 2011....

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la empresa Autopistas C.E.S.A, a través del Jefe de Unidad de Desarrollo de RRHH Javier Mínguez, la posibilidad que me ha brindado para poder desarrollar este proyecto dentro del seno de la empresa de la que formo parte desde hace muchos años.

A la propia Universidad por disponer las herramientas y recursos necesarios para que esto sea posible.

A mi Director de proyecto, José María Pallarés por estar siempre dispuesto a ayudar y por la paciencia tan grande que tiene.

A mis tutores de Universidad, los Doctores Pau Solsona y José Antonio Ayllón por sus valiosos comentarios y sugerencias y sobre todo por haberme hecho sentir más que un alumno, un amigo.

A mi familia por su comprensión y apoyo.

Deliberadamente, dejo el último agradecimiento para mi gran amigo Rodrigo Basurto por su colaboración en la realización de los ensayos, sin importarle el tiempo dedicado.

Gracias a todos.

INDICE

Glosario.....	3
MEMORIA.....	7
1. Introducción.....	7
2. Objetivos.....	13
3. Metodología.....	14
3.1 Métodos de ensayo para determinar el estado de corrosión de las armaduras del hormigón armado.....	14
3.2 Mapas de potenciales por el método de medida de potencial de media pila.....	17
3.3 Método experimental.....	19
4. Resultados.....	31
6. Presupuesto.....	76
7. Bibliografía.....	77
ANEJO A: Estado del conocimiento I. Hormigón armado.....	79
<i>A.1. Introducción.....</i>	<i>79</i>
<i>A.2. Hormigón armado.....</i>	<i>80</i>
A.2.1 Componentes del hormigón armado.....	82
<i>A.3. Cemento Portland.....</i>	<i>86</i>
A.3.1 Composición química del cemento portland.....	87
A.3.2 Composición potencial.....	89
A.3.3 Hidratación del cemento portland.....	92
<i>A.4. Durabilidad de las estructuras de hormigón armado.....</i>	<i>96</i>
A.5.1 Agresión física al hormigón.....	99
A.5.2 Agresión química al hormigón.....	101
A.5.3 Agresiones por agentes biológicos.....	108
A.5.4 Agresión química a las armaduras.....	108
ANEJO B: Estado del conocimiento II. Corrosión de armaduras. ...	109
<i>B.1. Introducción.....</i>	<i>109</i>
<i>B.2 Fundamentos de la corrosión.....</i>	<i>110</i>
<i>B.3. Carbonatación del hormigón.....</i>	<i>113</i>
<i>B.4. Difusión de cloruros.....</i>	<i>116</i>
Resumen.	

Glosario.

Aflojamiento: Pérdida de tensión de un elemento traccionado. Pérdida de presión (apriete) en un elemento de conexión (tornillos, roblones...).

Alma: Elemento vertical o inclinado de una viga o cajón que une las cabezas o forjados superior e inferior.

Armaduras expuestas o superficiales: Percepción visual de las armaduras de un elemento, excluye las armaduras vistas por corrosión.

Armaduras vistas por corrosión: Exposición visual de las armaduras corroídas, con la pérdida del recubrimiento del hormigón.

Avispero: zona con árido visible y falta de lechada en una superficie de hormigón.

Calor de hidratación: Calor producido durante el proceso de hidratación. Cada uno de los constituyentes del cemento tiene un calor de hidratación diferente. El calor desarrollado es función de las proporciones de sus constituyentes, y es una propiedad de interés en ciertas aplicaciones [13]

Cargadero: En ciertas tipologías de puentes, elemento horizontal situado sobre las cabezas de los pilares o sobre los fustes de estribos abiertos, sobre el que se sitúan los apoyos del tablero.

Clinker: Producto resultante de la cocción de las materias primas del cemento, antes de su molienda y de la adición de yeso.

Coqueras: Oquedades en la masa del hormigón.

Corrosión: Proceso electroquímico por el que el hierro se disuelve como ión ferroso, desprendiendo electrones que reaccionan con el oxígeno atmosférico convirtiendo el agua en iones hidróxidos, que reaccionan con los iones ferrosos formando hidróxido ferroso que vuelve a oxidarse, formando óxido férrico hidratado (orín o herrumbre).

Corrugado: resaltos en la superficie de las barras de acero que favorecen y garantizan su adherencia con el hormigón. La corruga está normalizada y

tiene una determinada forma dependiendo del fabricante, diámetro de la barra y calidad del acero.

Delaminación: Efecto por el que se deshoja o exfolia el acero laminado.

Desagregación: Efecto por el que se disgrega la pasta de hormigón.

Desconchón: Pérdida de un pequeño trozo de material de un elemento.

Desgaste: Pérdida de material de un elemento producida por efecto de una abrasión.

Dintel: Parte superior o techo de un cajón cerrado. También parte superior de las pilas cargadero donde apoyan las vigas de los viaductos.

Eflorescencias: Manchas superficiales por conversión espontánea en polvo de diversas sales solubles, principalmente cloruros, sulfatos o carbonatos de metales alcalinos (Na, K, Ca), al perder el agua de cristalización.

Estados límite: Se definen como Estados Límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada

Estribos: Elemento de soporte del tablero en el extremo de un puente.

Fisuras: Grieta fina de abertura inferior a 1 mm.

Frente de carbonatación: Superficie que separa la capa de hormigón carbonatado del que no lo está.

Grieta: Hendidura producida en un elemento sólido. Se aplica cuando la abertura es superior a 1 mm.

Hastial: Partes verticales o muros que conectan la solera con el dintel en un cajón cerrado. También se aplica a los muros verticales de los pórticos abiertos.

Hinchamiento: Abultamiento de la madera u otro material, en presencia de agua.

Humedad: Se aplica a los paramentos en que aparecen indicios de agua, bien por capilaridad de los poros, bien por filtraciones.

Junta de calzada: Dispositivo de unión en las discontinuidades entre estribo-tablero o tableros consecutivos, dispuesto en la zona de rodadura.

Lajación: Desagregación. Referido a elementos de hormigón, dividirse en lajas o escamas. En elementos de acero es equivalente a la delaminación y en elementos pétreos o de madera es equivalente a exfoliación.

Latiguillo: Alambre de hierro dulce sin corruga, muy dúctil, que sirve para aproximar y fijar las caras opuestas de un encofrado.

Picaduras: Efecto que se produce en elementos de acero por corrosión localizada.

Segregación: Defecto similar al avispero, aunque en este caso el defecto se atribuye más bien a una mezcla de hormigón mal dosificada que a una mala ejecución como es el caso del avispero.

Recubrimiento de las armaduras: Capa de hormigón cuyo espesor es igual a la distancia entre la superficie exterior del hormigón y la generatriz más próxima al exterior de la armadura. Su misión es proteger el hierro de los agentes contaminantes.

Rotura: Quiebra violenta de un cuerpo sólido separándose en dos o más fragmentos.

Solera: Parte inferior o suelo de un cajón cerrado, normalmente no se ve el hormigón por estar tapado por la tierra del camino, por el aglomerado de una carretera o por el cauce de un río o de una riera.

Tablero: Elemento directamente portante de las cargas debidas al tránsito de vehículos y personas.

MEMORIA

1. Introducción

Las estructuras constituyen un elemento fundamental para conseguir la necesaria seguridad de las construcciones que en ellas se sustentan, tanto de edificación como de ingeniería civil, y en consecuencia, la de los usuarios. [1]

Entre los diferentes materiales que se emplean en su construcción, el hormigón es el más habitual, por lo que el proyecto y la construcción de estructuras de hormigón cobra una especial relevancia en orden a la consecución de dicha seguridad.

Las construcciones consideradas en este proyecto son puentes de carretera cuyas estructuras son de hormigón armado.

Las estructuras de hormigón armado se diseñan y proyectan para soportar las acciones mecánicas y medioambientales a las que van a estar sometidas durante su vida útil, en un estado de durabilidad aceptable.

Se entiende por vida útil de una estructura, el periodo de tiempo, a partir de su puesta en servicio, durante el cual debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptable sin requerir durante este periodo ninguna actuación importante de rehabilitación. [1]

El hormigón armado, mezcla de hormigón y de acero, es actualmente el material más habitual en la construcción de elementos estructurales.

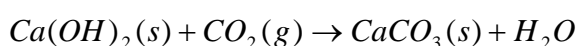
A pesar de ser un material considerado de altas prestaciones mecánicas, y muy estable en el tiempo, la corrosión de las armaduras representa su talón de Aquiles y su principal problema de durabilidad.

La corrosión se inicia cuando penetran en el hormigón agentes contaminantes capaces de romper la capa pasivante que se forma en la superficie de las armaduras embebidas en el hormigón.

Esta capa pasivante es una fina capa de óxido que queda fuertemente adherida a las armaduras y que impide la disolución del hierro en las zonas anódicas. De esta forma se impide la reacción de corrosión.

La capa pasivante se mantiene estable para valores de pH >12. Este pH está garantizado por el carácter básico tan alto de los álcalis de la pasta de cemento hidratada. Sin embargo, el medio ambiente que rodea al hormigón, tiende en todo momento a disminuir este pH mediante reacciones de neutralización que lo sitúan en una posición más estable desde el punto de vista termodinámico.

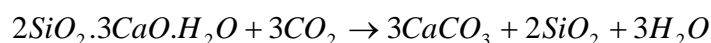
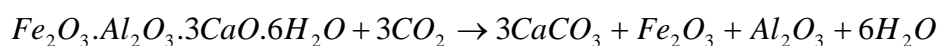
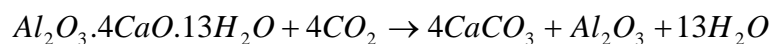
La reacción de neutralización más importante que se produce es la carbonatación, que podría definirse como la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera con el Ca(OH)₂ disuelto en la solución de los poros del hormigón, fundamentalmente,



Como resultado de esta reacción, el pH del hormigón desciende desde un valor de 12-13 (muy alcalino) a valores por debajo de 9. Una vez que el frente de carbonatación alcanza la armadura, esta queda expuesta a los agentes nocivos (oxígeno y la humedad ambiente) y comienza la corrosión.

De esta forma podemos decir que la vida del hormigón armado dependerá del tiempo que tarda el dióxido de carbono en ponerse en contacto con las armaduras; no ya por su acción directa, sino por permitir el acceso del oxígeno y la humedad ambiente. Una vez rota la capa pasivante, la presencia de oxígeno y humedad en los poros del hormigón en contacto con las armaduras inicia su proceso de corrosión. Un rasgo característico de la corrosión del acero embebido en el hormigón es la generación de macroceldas que albergan una coexistencia de áreas pasivadas y corroídas en la misma barra de armadura, formando una célula galvánica cortocircuitada, en que la zona corroída actúa como ánodo y la superficie pasivada como cátodo. El voltaje de esta célula puede alcanzar valores superiores a 0.5 V. El flujo de corriente resultante, está determinado por la resistencia eléctrica del hormigón y las reacciones anódica- catódica.

El resto de componentes de la pasta de cemento hidratada también sufren reacciones de neutralización por carbonatación según las reacciones siguientes, aunque no son importantes respecto a la disminución de pH [2]:

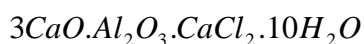


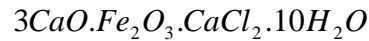
De la misma forma, el ión cloruro ataca la capa pasivante del acero pudiendo desencadenar procesos de corrosión. El ión cloruro destruye la capa pasivante localmente, facilitando la corrosión por picadura de las armaduras.

Para que esto ocurra, la concentración de ión cloruro en la superficie del acero ha de ser superior a un valor crítico de 0,4 % (en peso) respecto al contenido de cemento en el hormigón.

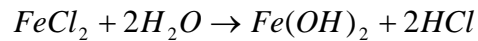
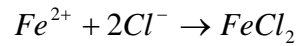
En el hormigón el ión cloruro se encuentra combinado químicamente, absorbido físicamente o en estado libre. Únicamente la parte de cloruro no combinada es la responsable de la corrosión de la armadura. Se estima que es aproximadamente el 0,4 % del cloruro, con respecto al peso del cemento, el que puede llegar a combinarse. La difusión del ión cloruro en el hormigón se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo cuando entra en contacto con los componentes del cemento.

Los componentes del cemento que reaccionan con el ión cloruro son el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferrito-aluminato tetracálcico (C_4FA), formándose cloro aluminatos cálcicos y cloro ferrito cálcico de composición aproximada:





Por otra parte las reacciones involucradas en el proceso de corrosión por cloruros son las siguientes:



Para conocer el grado de carbonatación y el contenido de cloruros en el hormigón en un instante determinado, se realizan principalmente los siguientes ensayos:

- Determinación del espesor de hormigón carbonatado mediante impregnación de las muestras de hormigón recién descubiertas (el contacto al aire de las superficies de hormigón hace que se carbonate rápidamente), con una disolución alcohólica de fenolftaleína al 1 %. Esta sustancia es un indicador de pH que presenta color rosa-violeta a pH >9, resultando incoloro a pH neutros o ácidos.
- El contenido de cloruros: la cantidad de ión cloruro Cl^- libre, existentes en la fase acuosa se determinan normalmente a través de valoraciones volumétricas. Si los cloruros provienen del exterior, es conveniente obtener un perfil de concentración de cloruros, tomando muestras a diferentes profundidades, para conocer el gradiente de concentración y estudiar la difusión desde la superficie del hormigón hasta su armadura.

Siendo la corrosión de las armaduras el principal problema de durabilidad, no es de extrañar que muchos de los modelos de durabilidad estén basados en la corrosión de armaduras.

Uno de los modelos más conocidos y aplicados, es el modelo de Tuutti (figura 1) [3], en el que se pueden distinguir varias zonas o periodos:

- Periodo de iniciación de la corrosión: coincide con el tiempo que tardan los agentes desencadenantes, carbonatación o ión cloruro, en llegar (tiempo de transporte) y en despasivar la armadura (tiempo de despasivación).
- Periodo de propagación: tiempo en que la armadura se corroe, hasta que llega a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad, funcionalidad o estética.

Según el modelo, la estructura cumple mientras el deterioro no alcance un cierto valor límite.

Desgraciadamente, cuando una estructura manifiesta síntomas de sufrir una determinada patología es, a menudo, demasiado tarde para realizar una intervención puramente preventiva, siendo necesario restauraciones más profundas que conllevan costes de conservación más elevados y niveles de garantía de éxito más bajos.

El concepto de durabilidad del hormigón armado se fundamenta en evitar que se alcance el periodo de propagación durante la vida en servicio de la estructura. Para ello es necesario poner los medios para prolongar lo máximo posible el periodo de iniciación, (conservación preventiva).

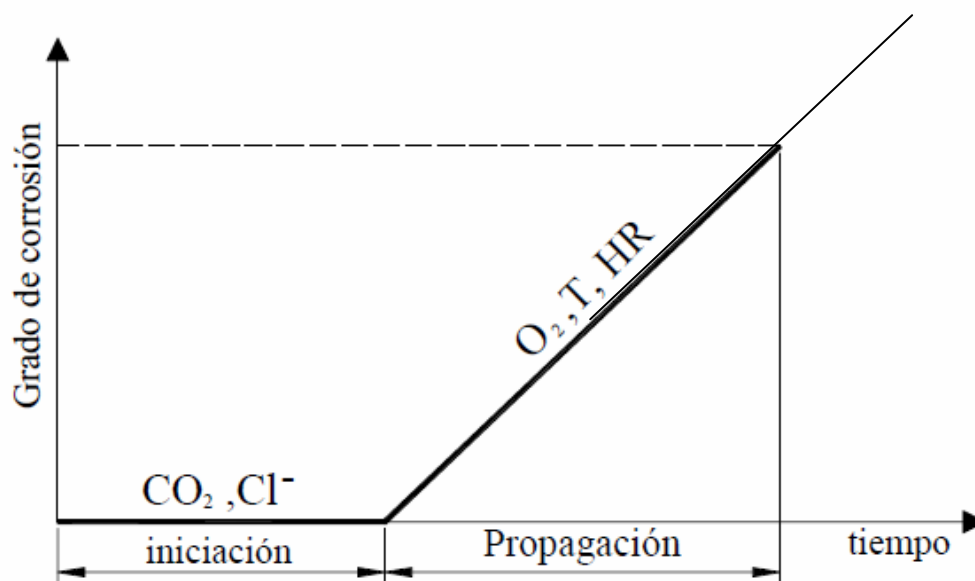


Figura 1. Modelo de durabilidad de Tuutti basado en la corrosión de las armaduras.

Para poder certificar que no hemos alcanzado el periodo de propagación de la corrosión debemos conocer en todo momento el estado de durabilidad o conservación de las estructuras. Para ello, es fundamental la vigilancia de las estructuras.

Esta vigilancia consiste normalmente en una revisión o inspección de forma metódica y sistemática, encargada por el gestor de la infraestructura, cuya misión es detectar cualquier anomalía que nos indique un funcionamiento anormal del elemento o un deterioro en los materiales.

Este tipo de inspección suele ser visual, con el apoyo de unos prismáticos, un martillo, un indicador de pH (fenolftaleína), una plomada, un metro, y un fisurómetro; no suele realizarse ensayo alguno si no lo requiere el inspector encargado del informe. Las herramientas con las que trabaja, son por tanto, sus ojos y su experiencia. Cuando se detecta algún tipo de anomalía o degradación en la superficie del hormigón, en sus armaduras, o bien una anomalía en el funcionamiento de alguno de los elementos que forman parte de ella, analiza las causas, valora su alcance y establece un orden de prioridad o de urgencia en la reparación de los daños observados. Siempre que se crea necesario, el diagnóstico de una patología observada, se constata y valora con ensayos en laboratorio.

2. Objetivos.

La inquietud existente en determinar las zonas de corrosión de una determinada estructura, antes de que se produzcan las primeras manifestaciones de ello en el hormigón (desconchados producidos por la oxidación de las armaduras), ha hecho plantear al autor de este proyecto, la necesidad de incorporar un método sencillo que junto con la inspección visual, permita determinar y valorar las zonas de actividad corrosiva del acero dentro del hormigón armado.

El objetivo principal de este proyecto de Fin de carrera es:

1. Valorar la inclusión del ensayo de medidas de potencial por el "método de media pila" [4] en las tareas de inspección visual de las estructuras, como método de predicción del estado de corrosión del acero en el hormigón armado.

Se establecen otros objetivos de carácter secundario pero no por ello carentes de importancia como son:

2. Determinar las zonas más habituales o susceptibles de corrosión, para cada tipo de puente estudiado.
3. Asociar las zonas de corrosión, con los factores principales que intervienen en el desarrollo de la corrosión.
4. Establecer un método de control indirecto sobre los métodos de reparación utilizados.

El proyecto se plantea desde la necesidad de disponer de un método sencillo y rápido que sea capaz de determinar las zonas activas dentro de la masa del hormigón. A partir de este conocimiento, se prevé poder valorar la evolución en el tiempo de una determinada patología, adoptar las medidas preventivas necesarias para eliminar o frenar su evolución y también, para poder controlar la eficacia de los sistemas de reparación empleados en las estructuras de los puentes.

3. Metodología.

Para alcanzar estos objetivos se ha seguido la siguiente metodología:

- Se ha revisado la bibliografía existente sobre los métodos empleados para evaluar el estado de corrosión de las armaduras.
- Se ha puesto en marcha y calibrado un electrodo portátil de Cu/CuSO_4 que ha servido para la realización de toda la parte experimental.
- Se ha realizado una campaña de ensayos de medida de potenciales con el método de media pila, sobre un grupo de puentes carreteros y analizado cuidadosamente los resultados obtenidos, con el fin de valorar la conveniencia o no de incluir este ensayo en las tareas de inspección, como método de predicción del estado de corrosión de las armaduras en el interior del hormigón.

Se ha llevado a cabo una revisión de la bibliografía sobre el hormigón armado y sus patologías en general y sobre la corrosión de las armaduras en particular.

3.1 Métodos de ensayo para determinar el estado de corrosión de las armaduras del hormigón armado.

El estudio de la corrosión de las armaduras de acero en el hormigón armado, se realiza habitualmente mediante la aplicación de métodos electroquímicos. Uno de los principales problemas para su empleo en el hormigón armado, es la complejidad del propio hormigón como electrolito. El fundamento de la mayor parte de las técnicas electroquímicas se basa en provocar una perturbación al sistema. Esta puede ser tal que se produzca una alteración irreversible del equilibrio, invalidándose el acero para posteriores medidas, considerándose entonces la técnica como destructiva. Sin embargo, existen otros métodos en los que las polarizaciones aplicadas son tan pequeñas que prácticamente no alteran el acero y permiten seguir la evolución del proceso con el tiempo, siendo entonces la técnica no destructiva.

Los métodos electroquímicos que más frecuentemente se han aplicado al hormigón armado son:

- Registro de potencial de corrosión.
- Curvas de polarización.
- Resistencia de polarización
- Medidas de impedancia
- Medidas de ruido electrónico.
- Análisis de armónicos.

Todos los métodos citados son aplicables sobre probetas de hormigón armado siendo el estudio de la corrosión realizado en laboratorio. Las probetas reproducen las características y condiciones medioambientales del hormigón armado de la estructura estudiada.

El estudio in situ de la corrosión de las armaduras del hormigón armado sobre estructuras reales, únicamente se realiza con uno de los métodos siguientes:

- Mapas de potenciales.
- Medidas de velocidad de corrosión.

Los mapas de potenciales consisten en la medida del potencial de corrosión en puntos separados una cierta distancia y distribuidos uniformemente por toda la superficie de la estructura a estudiar. El potencial de corrosión se registra como la diferencia de potencial existente entre un electrodo cuyo potencial es constante y estable (en nuestro caso el electrodo usado es de Cu/CuSO_4) y la armadura. Los datos de potenciales obtenidos por este método se representan según líneas o superficies equipotenciales que indican las zonas de actividad con probabilidad de corrosión de las armaduras. Es sin duda el método más utilizado en campo por su facilidad de puesta en obra y sencillez del equipo. Es un método que nos proporciona una estimación cualitativa del deterioro de las armaduras.

Los métodos que miden la velocidad de corrosión consisten fundamentalmente en la aplicación desde el exterior de una pequeña señal

eléctrica a la armadura, y analizan la respuesta de la señal a través del hormigón. [5]

Esta señal puede ser en corriente continua o en corriente alterna. Si es en corriente continua la técnica que se utiliza es la denominada "resistencia de polarización" desarrollada por Stern y Geary en 1957. La resistencia de polarización se calcula como el cociente entre la diferencia de potencial aplicada (aproximadamente 10 mV) y la intensidad de respuesta del sistema.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

Calculando la intensidad de disolución del metal a partir de la relación entre esta y la R_p .

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

Donde B es una constante que en el hormigón varía entre 26 y 52 mV.

A partir de la I_{corr} se puede calcular la pérdida gravimétrica del metal a lo largo del tiempo empleando la ecuación de Faraday, que relaciona este valor con la pérdida de peso, integrando ésta en función del tiempo.

El ensayo de medidas de velocidad de corrosión, requiere equipos sofisticados, presentando problemas que se refieren a la pérdida o atenuación de la señal.

Este proyecto se decanta por la utilización de mapas de potenciales, realizados a partir del ensayo de medidas de potencial de media pila, por ser una técnica no destructiva, de fácil aplicación, que no requiere el empleo de equipos caros ni sofisticados.

A continuación se describe este método.

3.2 Mapas de potenciales por el método de medida de potencial de media pila.

El método de medidas de potencial de media pila determina la diferencia de potencial del hierro embebido en el hormigón y un electrodo de Cu/CuSO₄ saturado (Figura 2).

Estas medidas se representan en mapas de superficies o líneas equipotenciales que permiten localizar las zonas de máxima corrosión en los lugares con valores de potencial más negativos.

El uso de la técnica se describe en la norma americana ASTM C876-87, correspondiente al método estándar para medida de potenciales por el método de media-pila en armaduras embebidas en hormigón. "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". ASTM Designation. : C876-87 [4]

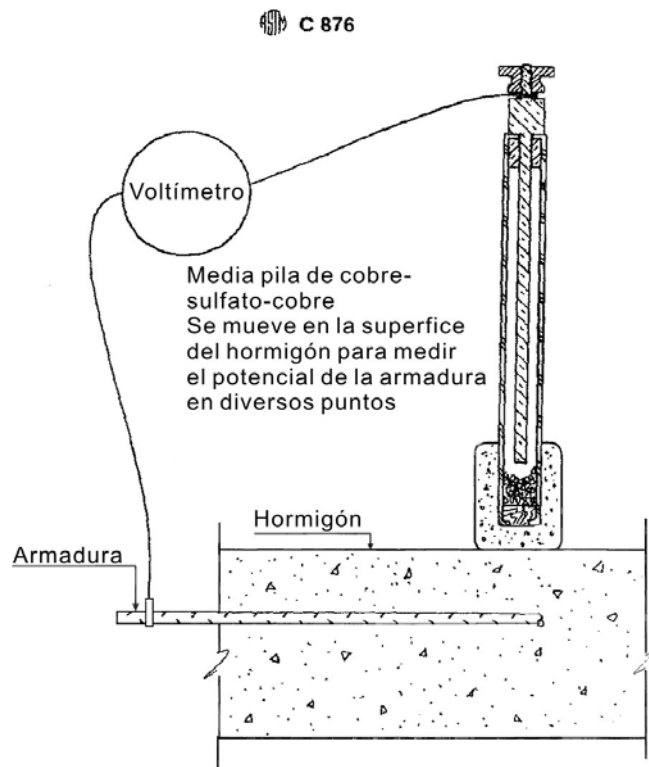


Figura 2. Electrodo de Cu/CuSO₄. Esquema del modo operativo (ASTM C876)

Las medidas nos indican la facilidad de transferencia de electrones entre un metal y el ambiente en que se encuentra, en nuestro caso entre el acero y la solución de los poros de la pasta de cemento.

El método de medidas de potenciales por media pila es un método sencillo, aplicable in situ, que se puede englobar dentro de ensayos del tipo no destructivo, aunque requiere un contacto con la armadura. Los valores de los potenciales medidos, nos indican la probabilidad de zonas activas de corrosión en el hormigón armado.

Señalar que se trata de un método cualitativo que no permite cuantificar la intensidad de corrosión ni su velocidad, siendo necesario complementarlo con otro tipo de ensayos para su cuantificación (ej: pérdida de peso del metal).

Los ensayos son referidos siempre a las armaduras pasivas del hormigón armado, no siendo aplicable este método a las armaduras activas de las estructuras postesadas por estar los torones de acero embebidos en una lechada rica en cemento y enfundada en una vaina de acero.

3.2.1 Factores que afectan al campo de potencial.

Las medidas de potenciales de las armaduras se realizan sobre la superficie del hormigón, esto hace que existan innumerables factores y combinación de ellos que afectan a los valores obtenidos.

Los factores que pueden afectar a las lecturas, hay que tenerlos en cuenta, si queremos dar una interpretación de los datos lo más coherentes posible con la realidad.

Dentro de los factores más importantes que influyen en los valores de potencial en un momento determinado, se encuentran los siguientes [6].

- La concentración del oxígeno en la interfase acero-hormigón: Una disminución del oxígeno en la interfase acero-hormigón produce un potencial más negativo.

- La carbonatación del hormigón: Produce un potencial negativo aunque con valores no demasiado altos, (poco significativos).
- La concentración de ión cloruro: incrementa la negatividad del potencial de forma significativa.
- Resistividad del hormigón: Varía con las condiciones de humedad y presencia de agua en el hormigón, lo que hace obtener lecturas diferentes en condiciones atmosféricas diferentes.
- Si existen tratamientos del hormigón: capas de pintura, morteros de protección, inhibidores de corrosión etc. hay que tener cuidado con las lecturas obtenidas, puesto que estos tratamientos las pueden alterar de forma importante.
- Las medidas de potencial no son válidas para aceros galvanizados ni revestidos con materiales epoxídicos.

3.3 Método experimental.

Para alcanzar el objetivo se aplicó la norma ASTM C876-87 [4] y fue aplicado sobre estructuras reales, puentes de diferentes tipologías, situados a lo largo de dos de los ejes de comunicación por carretera más importantes de España (autopistas AP7 y AP2).

Además de las medidas de potenciales se realizaron inspecciones visuales de las estructuras, se determinó el frente de carbonatación mediante el método de la fenolftaleína y se comprobaron los espesores de recubrimiento de armadura mediante catas realizadas.

El recubrimiento de hormigón de las armaduras, ha sido medido con un flexímetro en las catas realizadas para la conexión del electrodo con las armaduras y también en las zonas donde el hormigón presentaba desconchados por oxidación de armadura.

El contenido de cloruro en las muestras no se determinó por ser un tipo de ensayo que requiere un laboratorio, quedando fuera del ámbito de la inspección visual y de los objetivos de este proyecto.

Previamente al inicio de los trabajos, se eligió un grupo de estructuras (puentes de diferente tipología de una autopista) que presentaban, en el momento de la toma de datos, un estado de deterioro importante, causado por diferentes patologías y que estaban incluidas en la campaña de restauración de obras de fábrica correspondientes al año 2010, campaña que forma parte de la estrategia de conservación del gestor de la infraestructura.

En este conjunto de estructuras, se han realizado medidas de potencial, antes de llevarse a cabo las obras de restauración, durante las mismas y al final de ellas. Esto ha permitido comprobar mediante catas y a través de las zonas saneadas, el grado de variación respecto a las medidas primeras. Además, después de la reparación realizada, se han vuelto a medir potenciales para poder determinar si el método se puede emplear para conocer el grado de efectividad de los sistemas de reparación empleados.

Por otra parte se eligieron al azar, otras estructuras situadas a lo largo de las autopistas AP7 y AP2. En estas estructuras se han tomado potenciales en distintas zonas dentro de los elementos de hormigón armado que forman cada una de ellas (pilares, estribos, tablero, aletas, aceras, etc.).

Para el análisis de los datos obtenidos se ha tenido en cuenta los diferentes climas de las zonas donde se ubican las obras y su proximidad al mar. Para ello, cada espécimen o muestra, se ha asociado a una estación meteorológica próxima a ella. Las estaciones meteorológicas consideradas para el estudio de los valores obtenidos, han sido codificadas con un número y son las que se indican en la tabla (Figura 3).

Nº Estación meteorológica	Provincia	Código
Albi	Lérida	3
Salou	Tarragona	4
Martorell	Barcelona	5
Mollet del Vallès	Barcelona	6
Maçanet de la selva	Gerona	7

Figura 3. Emplazamiento de estaciones meteorológicas y código.

Dentro de las obras analizadas, las más próximas al mar distan de él aproximadamente 2 Km.; en este proyecto se considera que a esta distancia ya existe un medio favorable para el ingreso de ión cloruro en la masa del hormigón.

De este modo, seleccionadas las obras y marcadas con un número o código de referencia, se ha procedido a la medición de potenciales. Los datos obtenidos se recogen en una hoja de cálculo y son representados mediante el programa, Excel, en un gráfico que constituye el mapa de potenciales del espécimen concreto en un momento determinado y por tanto, en unas condiciones ambientales determinadas.

Para la realización de la lectura ha sido necesaria la limpieza con rasqueta de la superficie de hormigón en cada punto y la humectación de los paramentos de hormigón (el hormigón está suficientemente húmedo para realizar las lecturas, cuando la lectura de potencial no varía o fluctúa en ± 20 mV durante un periodo de 5 minutos) [4]. Humedecido el hormigón, las lecturas han sido realizadas en el momento en que el voltímetro indicaba una lectura estable, al menos durante 4-5 segundos [6]. En muchas de las muestras se repitió el procedimiento con el fin de cerciorarnos de que las lecturas obtenidas no variaban.

También se presenta, como espécimen singular, un silo de almacenamiento de sales de deshielo que ha sido objeto de reparación y donde se ha aplicado el método de medidas de potenciales en la doble vertiente que se ha indicado: localización de las zonas corroídas y control de los sistemas de reparación que se han empleado. Además, en este caso, el contenido de cloruros dentro de la masa del hormigón fue determinado, previamente a este proyecto. La determinación de cloruros según norma UNE 83827/94 fue realizada por un laboratorio de control de calidad de Barcelona.

Se ha realizado un total de 26 muestras repartidas en nueve puentes de la autopista y una muestra adicional, diferente al resto por tratarse de un edificio, que se ha codificado como "silo"

La tabla (figura 4) recoge el número de muestra y el puente al que pertenece dicha muestra, siendo los códigos de cada una de ellas el siguiente:

Nº Muestra	CÓDIGO		
	Estructura-Nº Puente	Elemento	Estación
Muestra 1	7098382-N	E-S-amp.	7
Muestra 2	7098382-N	E-S-amp.	7
Muestra 3	7098382-S	E-S-ant.	7
Muestra 4	7097329-S	HM1-N	7
Muestra 5	7097329-S	HM2-N	7
Muestra 6	7097329-S	HM2-S	7
Muestra 7	7097329-S	DM1-	7
Muestra 8	7097329-S	HM1-S	7
Muestra 9	7131298	HM2-N	6
Muestra 10	7131298	HM4-N	6
Muestra 11	7131298	HM2-S	6
Muestra 12	7147201-S	P1	5
Muestra 13	7166295-S	P1	5
Muestra 14	7166295-N	P1	5
Muestra 15	7237395-S	EV1-2S	4
Muestra 16	7237395-S	EV2-3S	4
Muestra 17	7237395-S	EV3-4S	4
Muestra 18	2175758-B	HB-PL	3
Muestra 19	2175758-B	HB-PL	3
Muestra 20	2207856	E2	3-4
Muestra 21	2207856	P3-P2	3-4
Muestra 22	2207856	P3-E	3-4
Muestra 23	2214396	P3-P2	3-4
Muestra 24	2214396	P3-EZ	3-4
Muestra 25	2214396	P3-E2	3-4
Muestra 26	2214396	P3-EB	3-4
Silo	1	muro	4

Figura 4. Codificación de muestras realizadas.

Las muestras obtenidas en puentes situados a una distancia equidistante a dos estaciones, tienen asignado un código donde se indican los números de las estaciones equidistantes.

En cada espécimen (obra de fábrica = puente, viaducto, cajón, paso elevado), ha sido necesario dejar al descubierto un trozo de hormigón para conectar el electrodo a la armadura. (Figura 5).



Figura 5. Conexión a la armadura para lectura de potenciales.

Por supuesto es necesario que esta armadura esté conectada con el resto de las armaduras embebidas en el hormigón. Este requisito queda garantizado por la propia disposición y colocación de las armaduras, solapes entre ellas, cercos y barras de reparto, que dan continuidad al entramado metálico de una determinada pieza de hormigón armado. (Figura 6).

ARMADURAS EN MÓDULOS

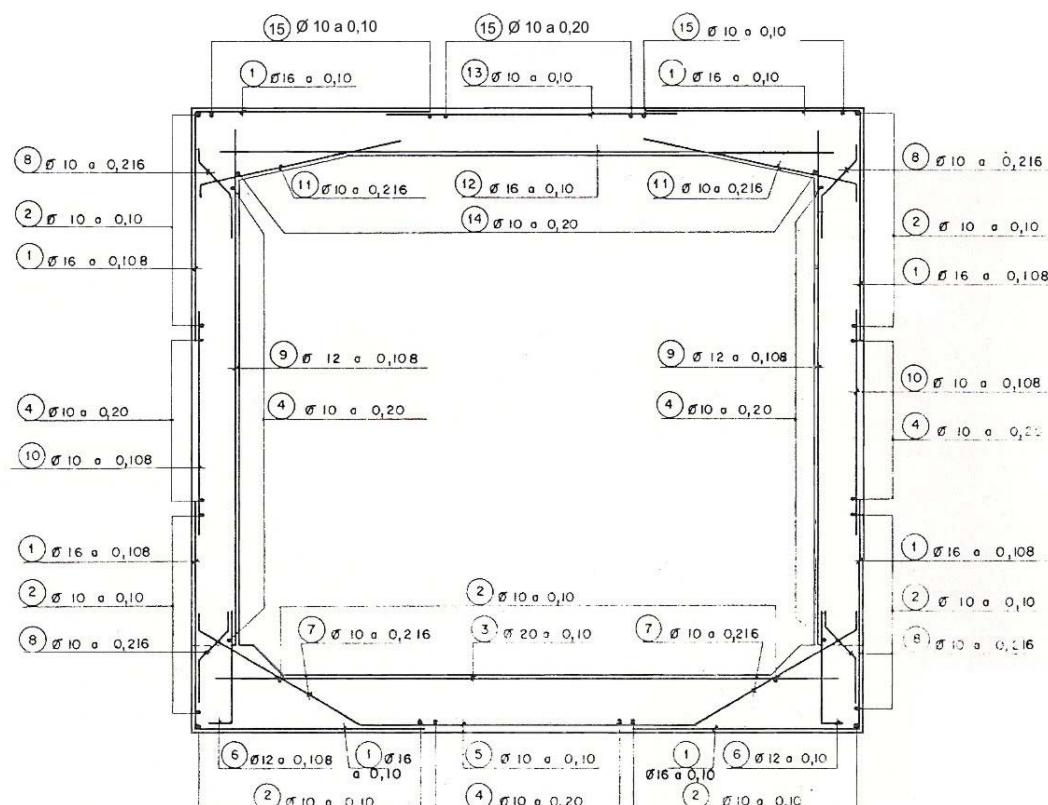


Figura 6. Plano de armaduras de un cajón de hormigón armado.

El conjunto de operaciones para la obtención de los puntos de medida ha sido el siguiente:

- Para cada elemento de la estructura analizado, se ha trazado una cuadrícula imaginaria cuyas intersecciones fijan los puntos donde se han realizado las lecturas de potencial. Esto se hace así con la finalidad de poder reproducir las lecturas en los mismos puntos pero en épocas diferentes. La cuadrícula se recoge en la libreta de campo con las referencias necesarias para poder reproducirlas.
- Se rescata y descubre una zona de armadura para conectar el electrodo a la armadura del hormigón.

- Se limpia con cepillo de alambre la zona descubierta de la armadura antes de hacer el contacto, eliminando de esta forma todo resto de cemento y de óxido.
- Se conecta el cable "masa" al voltímetro.
- Se conecta el voltímetro al electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 .
- Se limpian las superficies de hormigón donde se van a medir los potenciales y se humedece la superficie con agua.
- Se mide el potencial en un punto y se comprueba que la lectura no varía (o fluctúa en menos de ± 20 mV) durante un periodo de tiempo de 5 min. Si esto no es así, se humedecen de nuevo los paramentos de hormigón y se vuelve a realizar la comprobación.
- Se humedece la esponja, interface entre electrodo de referencia y paramento de hormigón con agua.
- Se procede a medir con el voltímetro la diferencia de potencial existente en todos los puntos de la muestra. Se toma como medida de potencial en cada punto considerado aquel valor que se mantiene constante durante 4-5 segundos.
- Se comprueba la carbonatación del hormigón mediante una solución alcohólica de fenolftaleína al 1%, en las zonas de contacto con las armaduras.
- Se miden y comprueban espesores de recubrimiento.
- Se anota en la libreta todos los datos.

Los resultados obtenidos se presentan en una hoja de cálculo con la representación de los valores en un gráfico que representa los mapas de potencial de la muestra.

3.3.1 Rangos de valores de potencial utilizados.

De acuerdo con la norma ASTM C876-87 las medidas que se obtienen pueden variar en el tiempo, dependiendo fundamentalmente de las condiciones de humedad y temperatura. Si el potencial medido en un punto no cambia u oscila en ± 20 mV en un periodo de 5 minutos, el hormigón está suficientemente húmedo para realizar las lecturas.

Los rangos considerados referidos a un electrodo de Cu/CuSO_4 y su significado, son los siguientes [4]:

- Si los potenciales sobre un área determinada son mayores de menos doscientos milivoltios ($>-200 \text{ mV}$) existe una probabilidad mayor al 90 % que las armaduras del hormigón armado sobre esa zona no presente oxidación.
- Si los potenciales sobre un área determinada presentan un rango entre menos doscientos milivoltios (-200mV) y menos trescientos-cincuenta milivoltios (-350mV), es decir, $-350\text{mV} < E < -200 \text{ mV}$, la probabilidad de actividad corrosiva es incierta.
- Si los potenciales obtenidos sobre una determinada zona son más negativos de menos trescientos-cincuenta milivoltios ($<-350\text{mV}$) existe una probabilidad de corrosión del 90 % en esa área concreta y en ese momento (en las condiciones ambientales y externas del momento de la medida).

El rango de incertidumbre que se sitúa entre -200mV y -350mV puede entenderse como una zona donde el acero está pasivado pero pueden aparecer zonas activas difíciles de localizar.

3.3.2 Equipo y Puesta a punto.

El equipo de medida (figura 7) está formado por:

- Un electrodo portátil de Cu/CuSO_4 . (Figura 8).
- Un multímetro digital de $10 \text{ M}\Omega$ de resistencia interna.
- Cable.
- Esponja de contacto electrodo- hormigón.
- Agua y solución saturada de CuSO_4 .
- Otros (cepillo de alambre, cinta adhesiva, libreta de campo).



Figura 7. Equipo de medida y utensilios empleados.

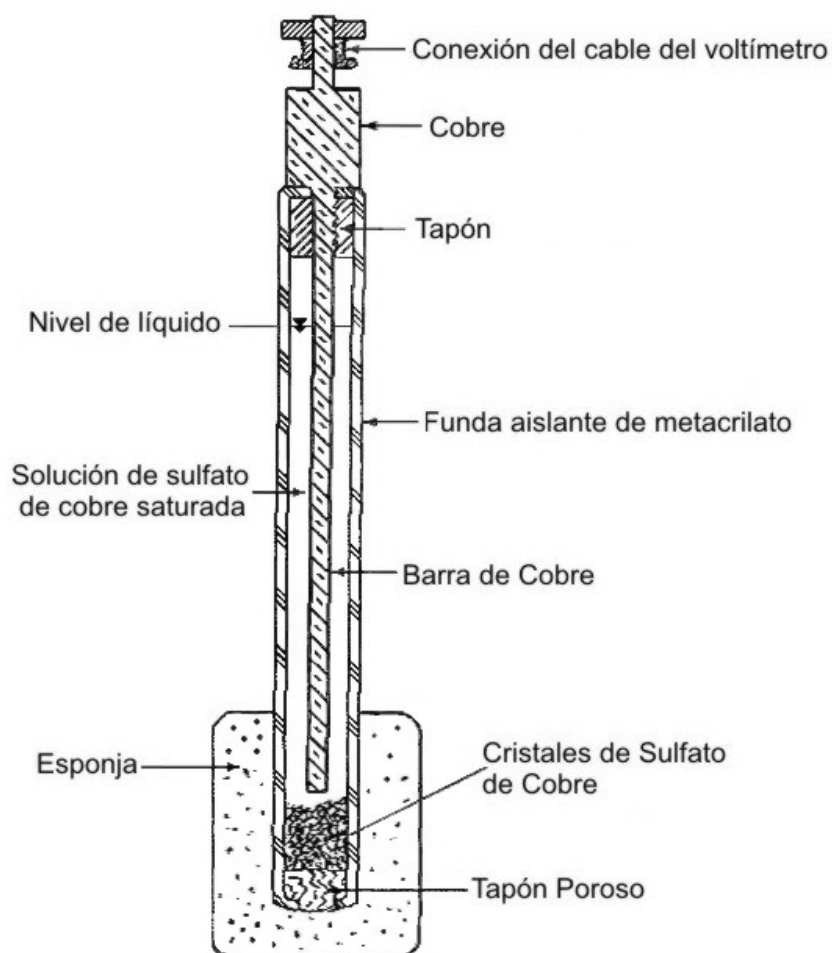


Figura 8. Partes de que consta el electrodo utilizado (ASTM C876) [4]

Antes de la toma de datos el electrodo utilizado, fue contrastado con dos electrodos usados por una empresa de reconocido prestigio encargada de realizar protecciones catódicas por corriente impresa en tuberías enterradas de gas, entre otros.

Para su comprobación se utilizó una barra de acero clavada en tierra humedecida. El hierro se conecta con el polo negativo del multímetro y el polo positivo se conecta al electrodo puesto en contacto con la tierra humedecida (electrolito). Esta comprobación se realizó con los tres electrodos disponibles, haciendo la misma comprobación con una barra de zinc conectada al hierro sumergido.

Los potenciales obtenidos entre el electrodo y el acero fluctúa entre -598 mV y -630 mV (Figura 9); y los potenciales entre el electrodo y el hierro zinc alrededor de -990 mV. (Figura 10.). Las diferencias encontradas entre unos y otros son tan pequeñas que se da por válido el electrodo empleado.



Figura 9. Medida de potencial del hierro enterrado en tierra húmeda. Comprobación del electrodo.

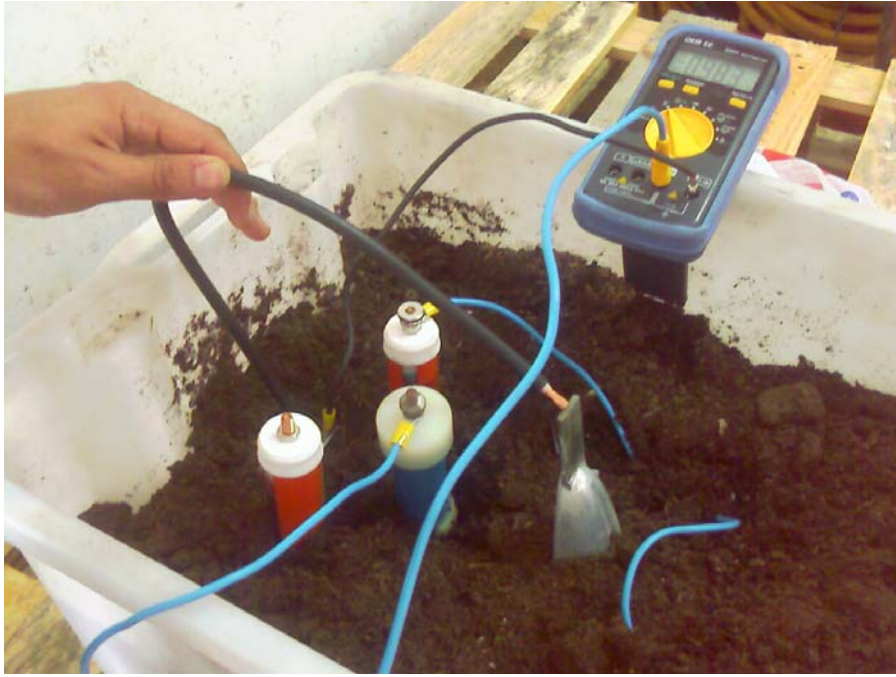


Figura 10 Medida de potencial del hierro con zinc enterrado en tierra húmeda. Comprobación del electrodo.

4. Resultados

Estructura 1. Puente bajo la autopista que da paso a una riera y camino. Está formada por una losa que apoya sobre dos estribos o cargaderos. En esta obra se han realizado tres muestras.

Plano n°1; Fecha: 27/07/2010; $T=28^{\circ}\text{C}$; $HR_{\text{MEDIA}}=55\%$

○ Muestra 1

Actualmente este puente está siendo objeto de una restauración debido a la existencia de zonas importantes de hormigón que manifiestan una clara oxidación de las armaduras (Figura 11). El hormigón de esta obra presenta defectos desde su origen, que aunque afectan a una superficie pequeña, ha sido necesaria su rehabilitación. Los defectos a simple vista que se pueden ver son avisperos, coqueras, fisuras de retracción, humedades, eflorescencias y alguna zona con desconchones en el hormigón por oxidación de la armadura en esas zonas.

El espesor de recubrimiento carbonatado medido en varios puntos alcanza una profundidad de 1.5 cm, mientras que el recubrimiento de la armadura medido es de 2.5 cm. Las zonas de corrosión corresponden a zonas con escaso recubrimiento de armadura. En estas zonas el frente de carbonatación y el recubrimiento coinciden. También la existencia de coqueras en los paramentos de hormigón facilita la entrada de agentes agresivos que pueden producir corrosión.

Comentar que el puente está situado en un entorno rural, alejado de ambientes industriales y del mar, con una climatología templada característica de un clima mediterráneo.

Señalar que la carbonatación se ha medido en el mismo instante de hacer la cata en el hormigón, sin existir la posibilidad de carbonatación de su superficie por el tiempo transcurrido. Las zonas donde se realizan las catas, sirven para conectar las armaduras al electrodo de nuestro sistema.



Figura 11. Corrosión de armaduras en la zona de estribo ampliado

Las zonas que presentan oxidación, coinciden con zonas de escaso recubrimiento, apenas llegan al centímetro de recubrimiento, y además presentan una humedad importante. En zonas de las aletas que acompañan a los estribos, en las zonas bajas de estos muros en contacto con el suelo también se observan zonas oxidadas (figura 11).

Las medidas de potencial realizadas presentan un 35 % de la superficie, con una probabilidad de corrosión del 10%, correspondiendo con las zonas azules del mapa de potenciales (Figuras 12 y 13) y unas zonas que alcanzan el 65 % de la superficie, con una probabilidad incierta de corrosión. Señalar que las zonas inferiores, próximas al suelo presentan los valores más negativos. Existe un ligero gradiente de potenciales entre las zonas altas y las zonas bajas del hastial. También se manifiestan zonas aisladas con posibilidad de oxidación del 90 % (zonas rojas).

Dado que esta estructura está siendo reparada se ha podido contrastar los valores de potencial medidos, con el estado real de las armaduras. En prácticamente todos los casos donde se daban valores de $E < -300\text{mV}$, las catas realizadas han constatado la oxidación de las armaduras en más o menos grado. Sin embargo en las zonas donde aparece hierro a la vista los potenciales encontrados son menos negativos. Esto es posible, si tenemos en cuenta que el electrodo se sitúa en el hormigón en un plano por detrás

de la armadura descubierta; es decir, estamos midiendo el potencial de las armaduras ocultas.

Respecto a la corrosión que se observa en las barras descubiertas, no parece que sea demasiado severa, siendo que después de ser limpiadas de óxido mediante chorro de arena, no se observa pérdida importante de sección (aún siendo de diámetros pequeños) encontrándose la corruga prácticamente intacta.

La parte superior izquierda de la fotografía (figura 11) que presenta corrosión evidente, coincide con la zona de color azul de la parte izquierda del mapa de potenciales. Parece coherente si tenemos en cuenta el plano de medición

La figura 13 corresponde a la aleta del estribo (muro en este caso perpendicular al frontal que vemos en la figura nº 12 por su parte izquierda). Se observa claramente potenciales muy negativos. La parte triangular de la muestra coloreada en un color verdoso, no corresponde con medición alguna por ser la aleta de forma triangular.

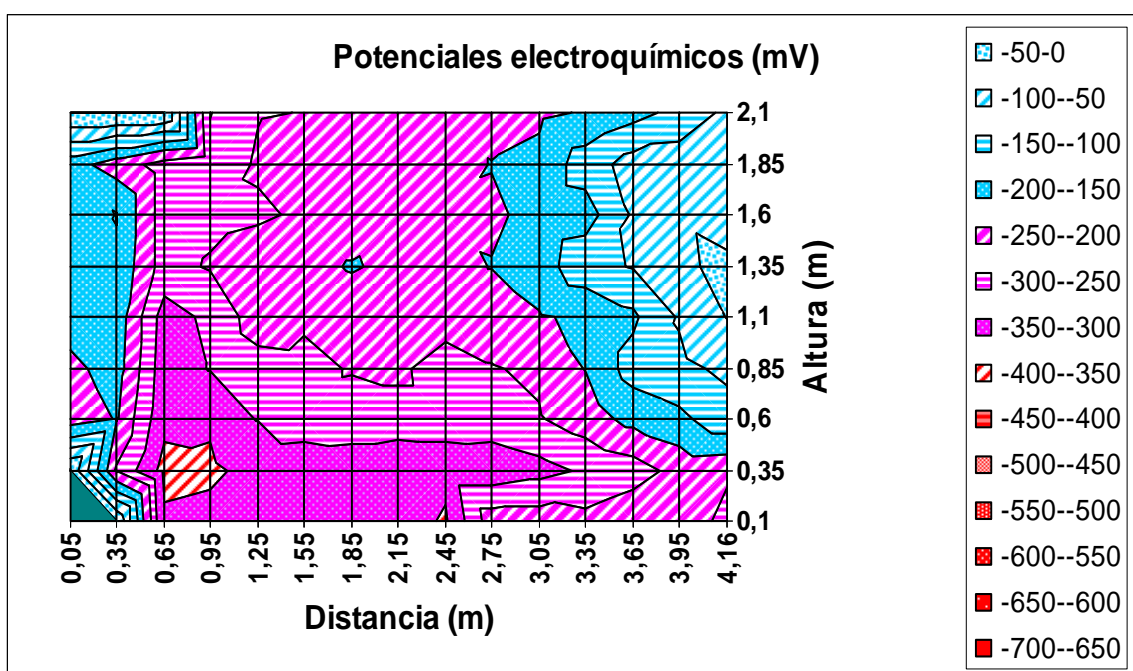


Figura 12. Muestra 1.

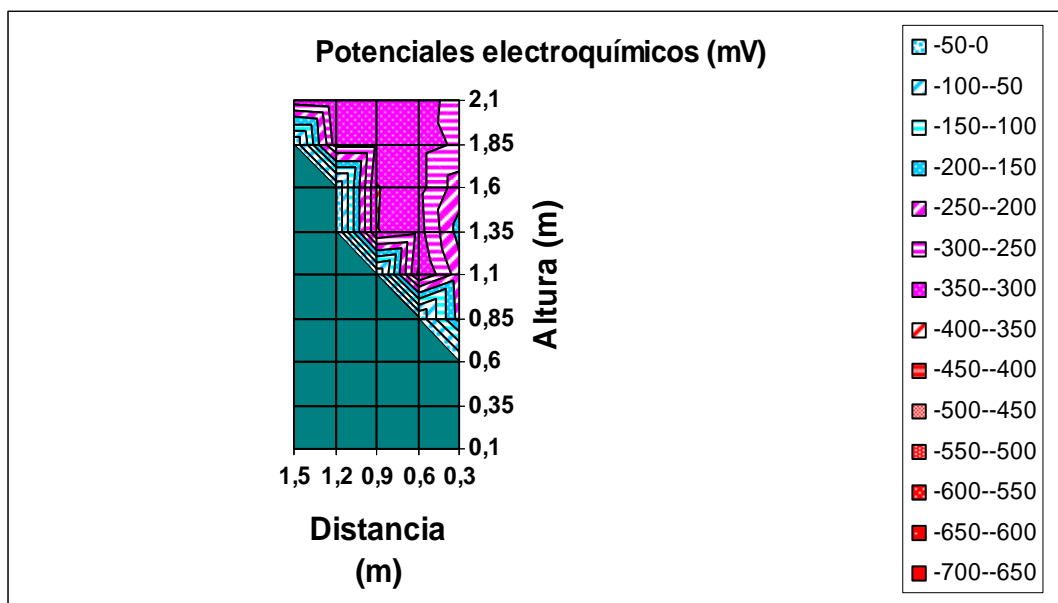


Figura 13. Muestra 1. (Aleta)

○ **Muestra 2**

Se mide una zona carbonatada de 1,5 cm y un recubrimiento de 2 cm. El aspecto del hormigón en la zona de la muestra 2, es mejor que para el caso de la muestra 1. Se observa una superficie más cerrada y un hormigón más compacto. No hay roturas ni manifestaciones de desperfecto asociados con la oxidación de las armaduras. (Figura 14). Respecto a los valores de potencial, decir que son algo mejor que los obtenidos para la muestra 1 y que los potenciales con valores más negativos se vuelven a encontrar en las zonas bajas en contacto con el terreno. (Figura 15.)



Figura 14. Carbonatación del hormigón y recubrimiento de armaduras

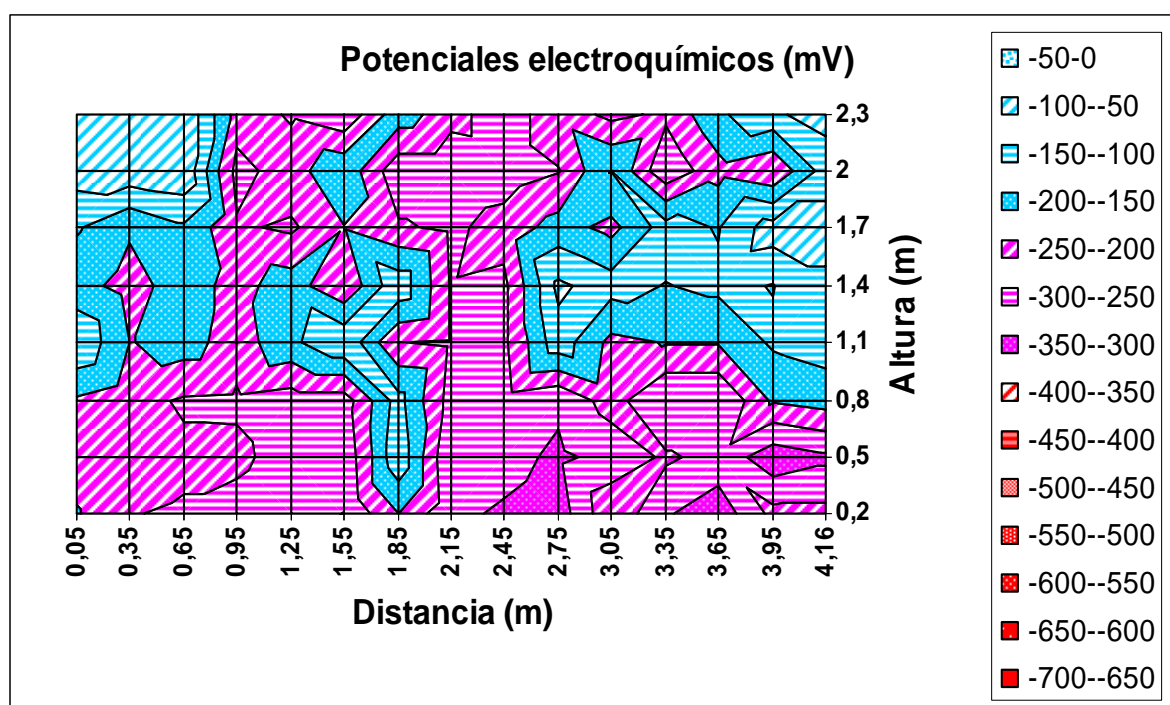


Figura15. Muestra 2

Si analizamos el mapa de potenciales podemos ver que el 45% de los puntos presentan unos valores entre -200 y -350 (zona de incertidumbre) con un 5% que alcanza dentro de este rango de incertidumbre los valores más altos (zonas próximas al suelo). El resto de los puntos se sitúan en zona de probabilidad de corrosión muy baja. No se observa tendencia alguna de los potenciales. La muestra recoge la totalidad de la altura del muro en una longitud de 4,5 m. Comentar que el agua de escorrentía procedente de la calzada pasa a través de las juntas de calzada y discurre por los paramentos verticales del hastial. Esto hace que existan a lo largo del cargadero (donde apoya la losa) manchas de humedad y que la escorrentía pueda, con el tiempo, erosionar o lavar la pasta de cemento de estas superficies de hormigón.

○ **Muestra 3**

La muestra corresponde a una zona amplia del cargadero sur (el mismo donde se realizó la muestra 1) y recoge una parte importante del cargadero, quedándose prácticamente a media altura desde el suelo. El mapa de potenciales, demuestra que la zona de potenciales más negativos

se encuentra en las zonas inferiores donde existen valores de $E < -350\text{mV}$ situándolos en zona de clara oxidación. Por el contrario en las zonas altas (sobre los dos metros) comienzan a aparecer zonas con una baja probabilidad de corrosión. Se constata mediante catas, que las zonas más negativas coinciden con armaduras oxidadas.

En este caso existe claramente un gradiente de potenciales desde las zonas altas con gradientes menos negativos y las zonas bajas con gradientes muy negativos (Figura 16). El espesor de hormigón carbonatado medido en la zona es de 1,5 cm y los recubrimientos de armadura encontrados sobre zonas oxidadas prácticamente coinciden con el frente de carbonatación. El hormigón presenta zonas con coqueras, avisperos y pequeños desconches por oxidación de armaduras.

Tras la limpieza de las armaduras descubiertas, se observa que la pérdida de sección por este motivo es insignificante.

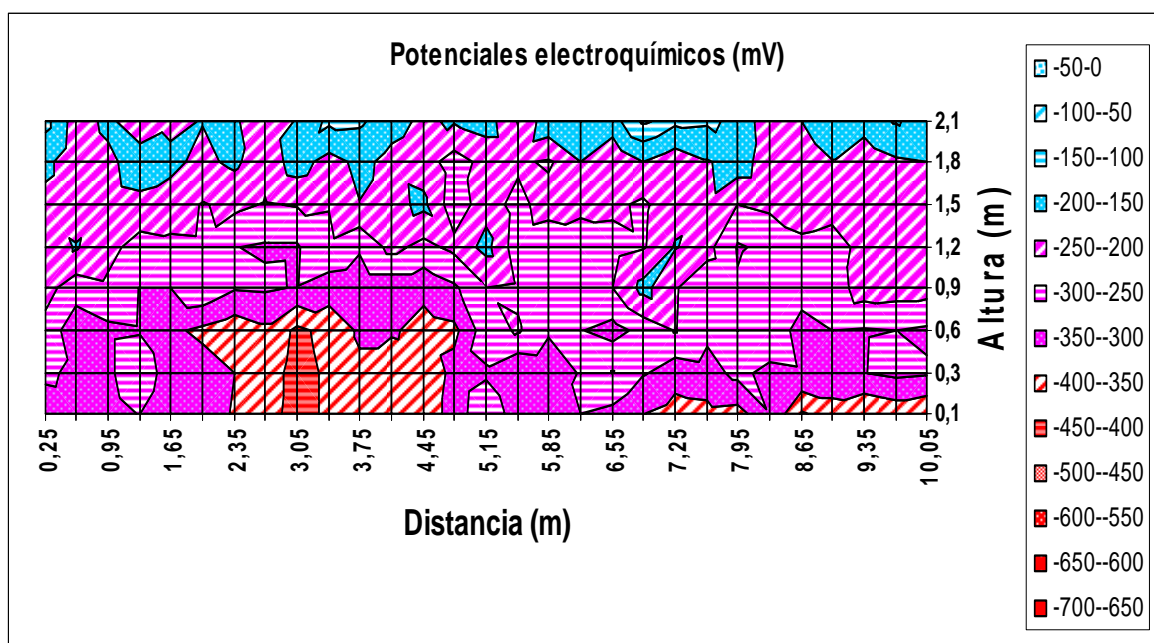
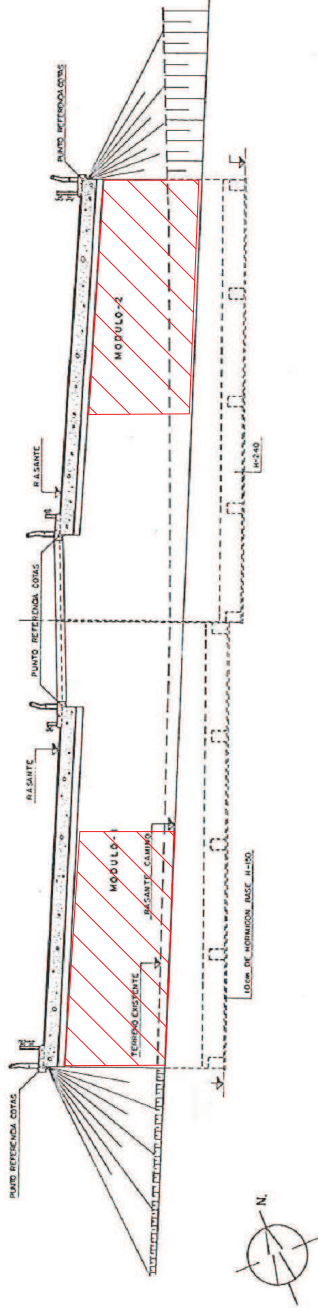
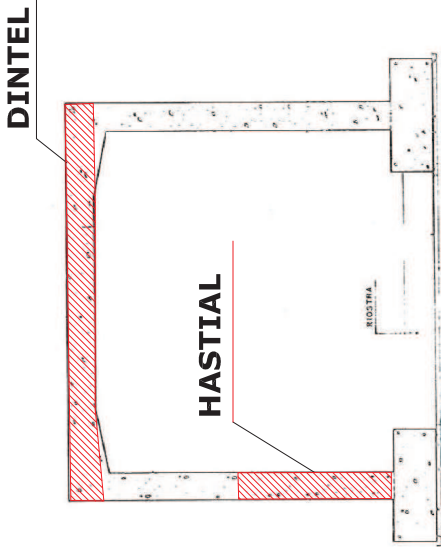


Figura 16. Muestra 3

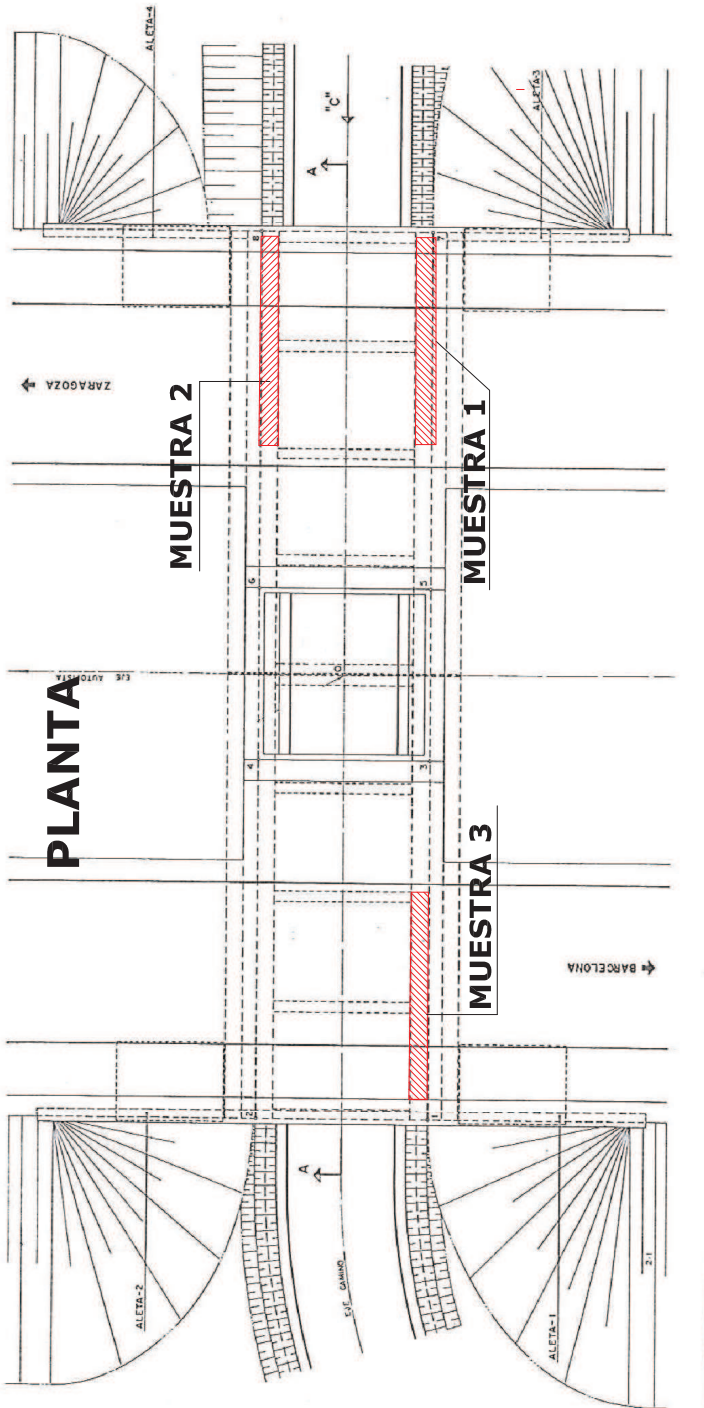
ALZADO



SECCIÓN



PLANTA



<div>UAB</div> <div>Universitat Autònoma de Barcelona</div>	AUTOR DEL PROYECTO	TÍTULO DEL PROYECTO	ESCALA	NOMBRE DEL PLANO:	FECHA:
	MIGUEL OLEA ARRANZ	<div>HORMIGÓN ARMADO: DURABILIDAD, MEDIDAS DE POTENCIALES DE CORROSIÓN COMO ELEMENTO DE CONTROL DEL ESTADO DE LAS ARMADURAS</div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>		

Estructura 2. Se trata de un cajón cerrado que sirve de paso bajo la autopista a una riera. En el momento de realizar las medidas de potencial se estaban realizando obras de reparación de la estructura, por lo que se pudieron contrastar en varios puntos del hormigón, el grado de acierto del sistema.

Plano nº2; Fecha: 21/07/2010; T= 28°C; HR_{MEDIA}=68%; Fecha: 23/07/2010
T= 26°C; HR_{media}=58%; Fecha: 28/07/2010. T= 27°C HR_{media}=64%

○ **Muestras 4, 5 y 6**

Se trata de una estructura que presenta una superficie de hormigón muy porosa. Existen zonas con armaduras vistas, sin recubrir, rodeadas de grandes zonas de coqueas que muestran segregaciones en el hormigón con áridos redondeados y pasta de cemento muy lavada (Figura 17 y 18). Son defectos claramente de origen, provocados por una mala dosificación de la mezcla, relaciones agua/cemento muy altas, heterogeneidad en las superficies que denotan además una deficiente ejecución y un escaso control de la obra.



Figura 17. Muestra 4 Aspecto del hormigón. Segregación del hormigón con armadura al aire y oxidada.



Figura 18. Muestra 4 Aspecto de la armadura. Zona de armadura al aire.

Buena parte de las armaduras de esta estructura se ha corroído por estar en contacto directo con el aire. No ha existido nunca cobertura de hormigón que la protegiera. A pesar de ello, la armadura expuesta al aire no presenta una corrosión excesiva. Posiblemente el clima y ambiente que rodea a la estructura no sea demasiado agresivo. El hormigón en general presenta muchas coqueras, avisperos y segregaciones siendo un hormigón muy poroso y poco compacto. Se han realizado medidas de potencial en varias zonas de la estructura. Los mapas de potencial de las muestras 4 y 5 presentan valores muy negativos en las zonas inferiores en contacto o próximas al suelo. En estas zonas próximas al suelo con valores $E < -350$ mV se han realizado catas, coincidiendo estas zonas con armaduras oxidadas.

Las zonas altas son de menor potencial que las inferiores, además de existir una zona central importante exenta de corrosión (Figuras 19 y 20). En los dos hastiales referidos, existiría un gradiente de potenciales definido entre las zonas altas y las bajas si no fuera por la banda estrecha que se observa de potenciales entorno a los -200mV.

La zona estudiada, presenta de forma clara un gradiente de potenciales de las zonas altas a las bajas (más negativas). Además comentar que a pesar

de la existencia de coqueras y segregaciones de origen el mapa de potenciales no refleja zonas de probabilidad alta de corrosión. (Figura 21).

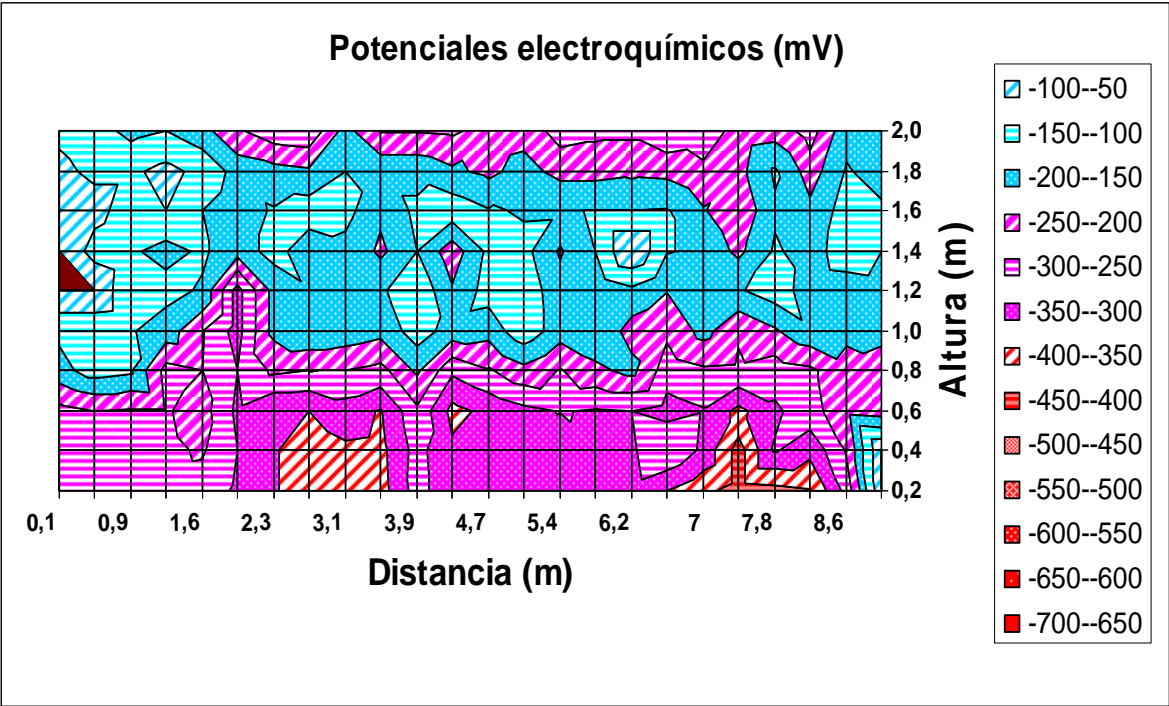


Figura 19. Muestra 4. Posible actividad de corrosión en la parte inferior.

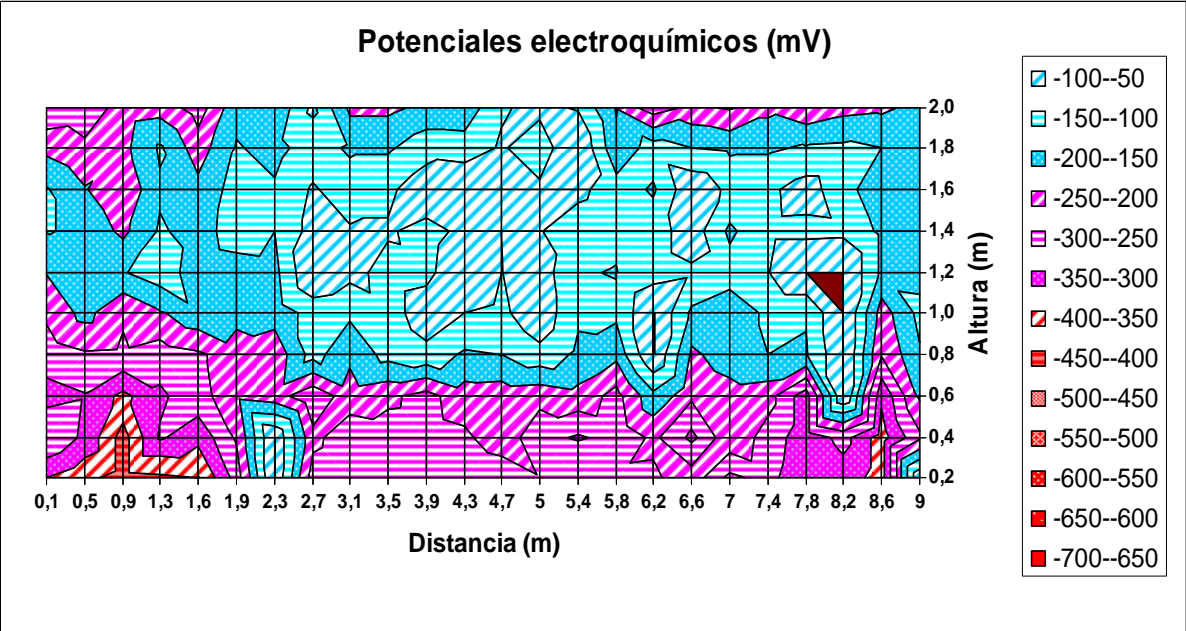


Figura 20. Muestra 5. Posible actividad de corrosión en la parte inferior

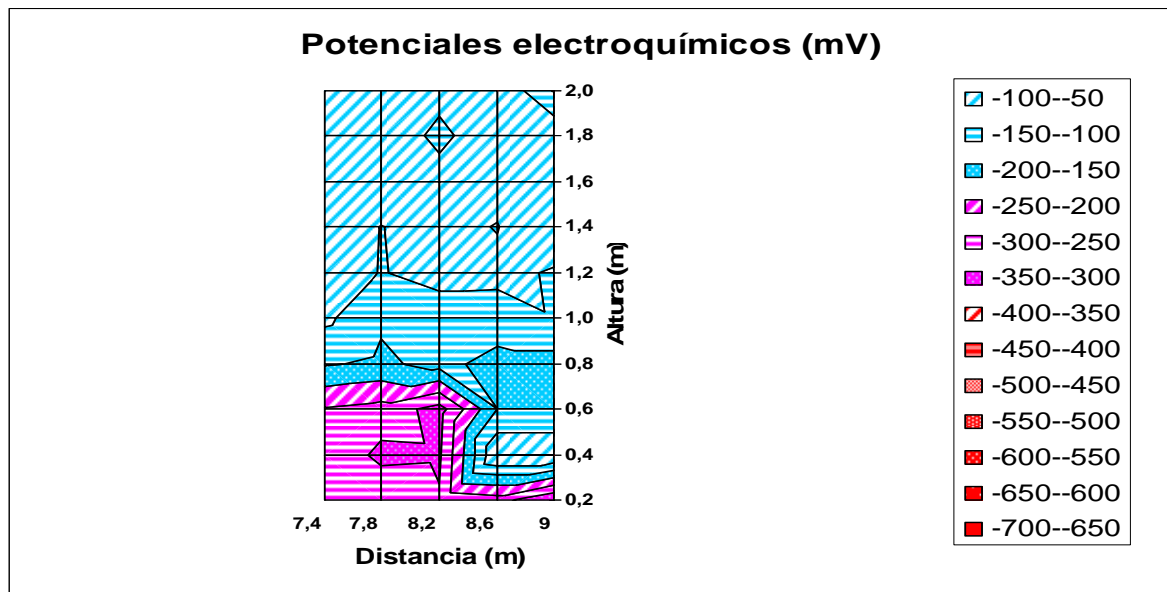


Figura 21. Muestra 6. Posible actividad de corrosión en la parte inferior.

○ **Muestras 7 y 8**

Finalmente, la muestra 7 y 8 que corresponde a una zona de dintel y hastial respectivamente, presenta zonas con una probabilidad baja de corrosión y zonas grandes de probabilidad incierta, con valores que se sitúan fundamentalmente entre los -200mV y los -300mV. (Figura 22 y 23). No se observa en el mapa ninguna relación entre las zonas.

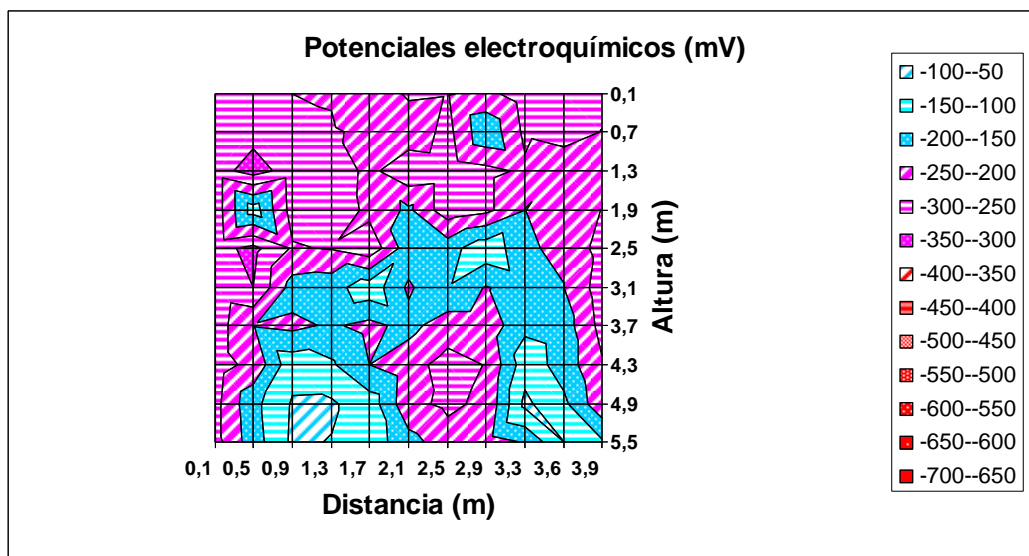


Figura 22. Muestra 7. Corresponde al dintel de la estructura.

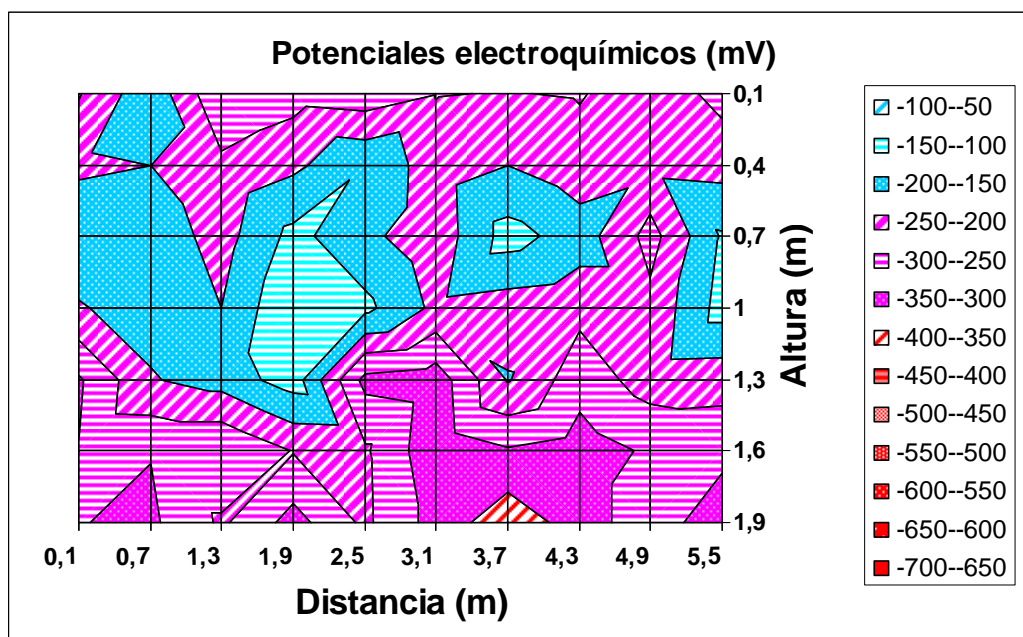


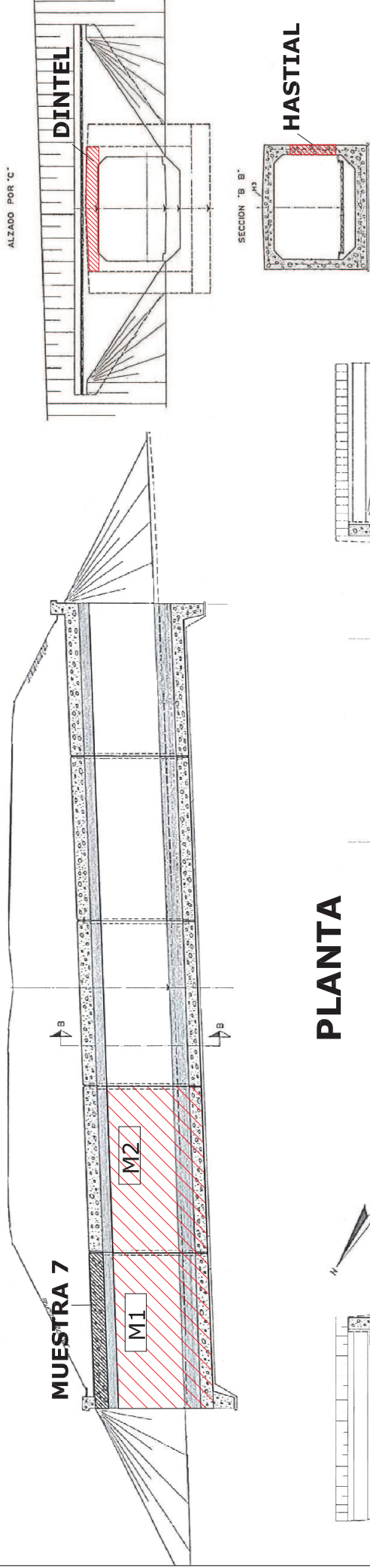
Figura 23. Muestra 8 Hastial continuación del dintel.

Comentar que en esta estructura se han colocado de forma permanente unas conexiones a las armaduras para poder tomar datos de potenciales en el futuro y poder comparar.

Estas conexiones permiten realizar un seguimiento en el tiempo de las medidas de potencial. En este caso se han medido potenciales sobre las zonas saneadas y regeneradas pudiendo comprobar que las mediciones obtenidas son distintas a las originales (menos negativas). Una vez reparada la zona, los potenciales obtenidos son sensiblemente más altos, pasando de la zona de incertidumbre a la zona con probabilidad de corrosión baja.

SECCIÓN A-A

ALZADO POR C



UAB Universitat Autònoma de Barcelona	AUTOR DEL PROYECTO MIGUEL OLEA ARRANZ	TÍTULO DEL PROYECTO HORMIGÓN ARMADO: DURABILIDAD, MEDIDAS DE POTENCIALES DE CORROSIÓN COMO ELEMENTO DE CONTROL DEL ESTADO DE LAS ARMADURAS	ESCALA  GRÁFICA	NOMBRE DEL PLANO: O.F. -7097329 PLANTA Y ALZADOS	FECHA: ENERO 2011
					PLANO NÚM. 02

Estructura 3. Se trata de un cajón cerrado que permite el paso bajo la autopista a un camino rural. En el momento de realizar las medidas de potencial se estaban realizando obras de reparación de la estructura, por lo que se pudieron contrastar en varios puntos del hormigón, el grado de acierto del sistema.

Plano n° 3; Fecha = 14/07/2010; T= 28° C; HR_{MEDIA}=66%

○ **Muestra 9, muestra 10.**

Se observan zonas deslavadas con coqueas de origen y paso de agua a través de latiguillos de encofrado, manchas de humedad, concreciones de sales en los paramentos, fisuras y grietas acompañadas de desconchones en el hormigón producidos por la corrosión de la armadura (Figura 24). Además de las manifestaciones de corrosión de las armaduras, se observan zonas importantes donde el hormigón se presenta muy poroso y otras donde el recubrimiento de las armaduras es escaso.



Figura 24. Aspecto del hastial de la obra de fábrica. Paso de agua por latiguillos y eflorescencias con marcas de humedad.

En la zona de dintel se aprecian pequeños desconchados de hormigón con riesgo de caída al camino. Se observa, escaso recubrimiento de las armaduras.

Estos deterioros no se producen por igual en los diferentes módulos que forman la obra. Para discernir el estado de degradación de cada uno de ellos se han realizado tres muestras, dos de ellas en módulos que presentan a simple vista un grado de deterioro importante y una muestra en uno de los módulos mejor conservado. Las muestras corresponden con el nº 9 y 10 en zonas deterioradas y la muestra 11 en uno de los módulos mejor conservados.

Como se ha dicho anteriormente, el análisis de potenciales coincide con la reparación de dicha estructura, lo que ha permitido contrastar la probabilidad de corrosión en zonas que se muestran activas con la corrosión de la armadura que presentan las zonas saneadas.

En términos generales, se puede decir que el grado de acierto en las zonas localizadas como activas, y las catas realizadas en esas mismas zonas ha sido alto.

Respecto a la carbonatación comentar que se ha medido un espesor de hormigón carbonatado de 1,4 y 1,8 cm. El recubrimiento de la armadura es de 2,5-3 cm salvo en los módulos 2 y 4 lado norte, donde se observan recubrimientos de 1,5 y 1 cm. El entorno donde se encuentra la obra es un entorno rural dentro de un clima templado.

También se han medido potenciales después de la reparación efectuada. Estas comprobaciones se han realizado sobre las zonas saneadas y reparadas con mortero, antes de pintar. El resultado ha sido un aumento significativo de los potenciales. Fuera de las zonas saneadas los resultados han sido los mismos. Finalmente se han dejado varias conexiones fijas a la armadura para poder realizar un seguimiento de los potenciales en el futuro.

A continuación (Figuras 25-26 y 27) se presentan los diferentes mapas de potencial obtenidos antes de la realización de las obras, donde se observa

una probabilidad alta de zonas activas (valores muy negativos) en las muestras 9 y 10. No se observa ningún patrón especial en los valores encontrados.

Los valores medidos después de la reparación no se han incluido por requerir de un análisis más profundo de los diferentes tipos de productos empleados en la reparación y la influencia de estos sobre las medidas de potencial por el método de media pila. Señalar únicamente el aumento de los valores en estas zonas saneadas y que los valores de potenciales medidos, una vez colocada la capa de protección a base de pintura de tipo acrílico, oscilan y son menos estables que los valores primeros.

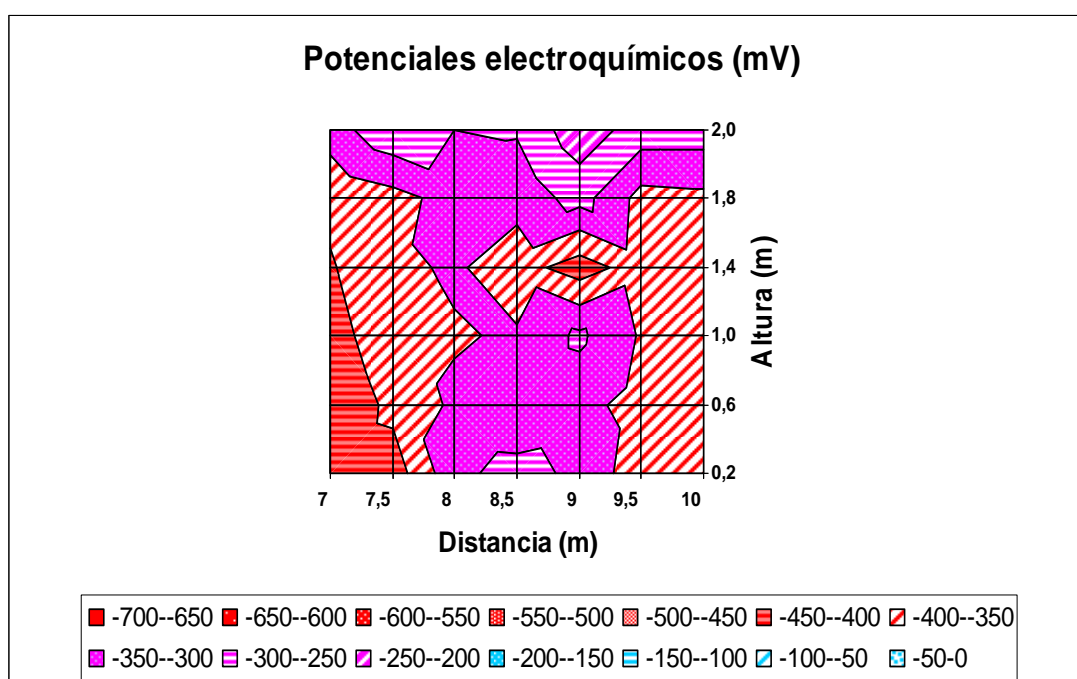


Figura 25. Muestra 9. Zonas muy activas con potenciales muy negativos.

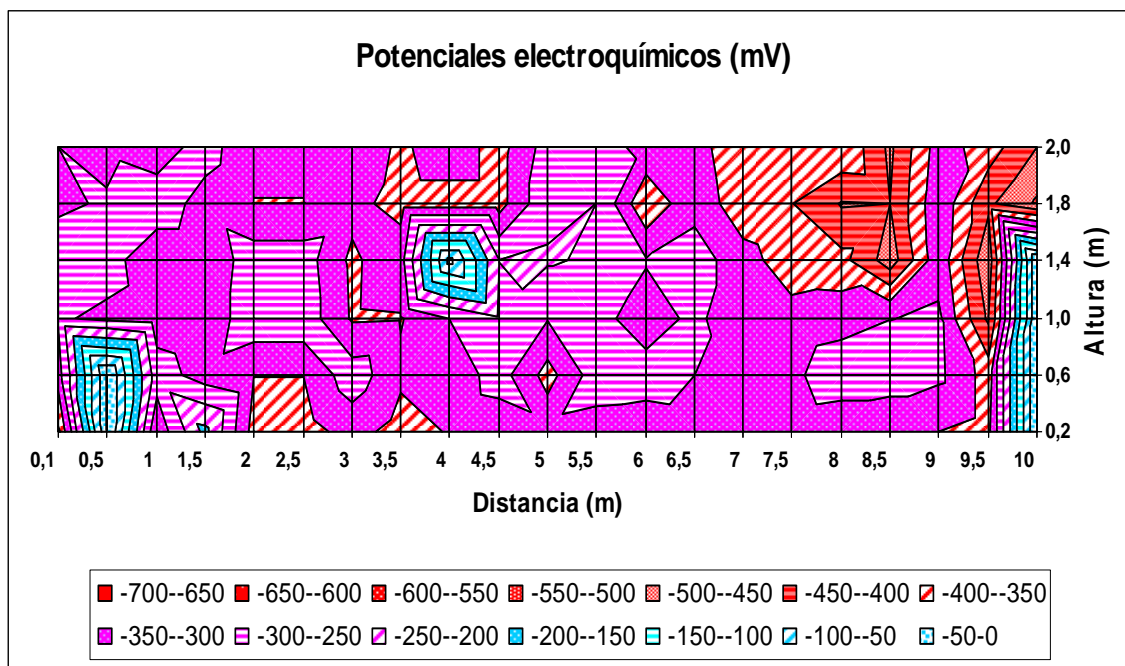


Figura 26. Muestra 10. Zonas muy activas con potenciales muy negativos.

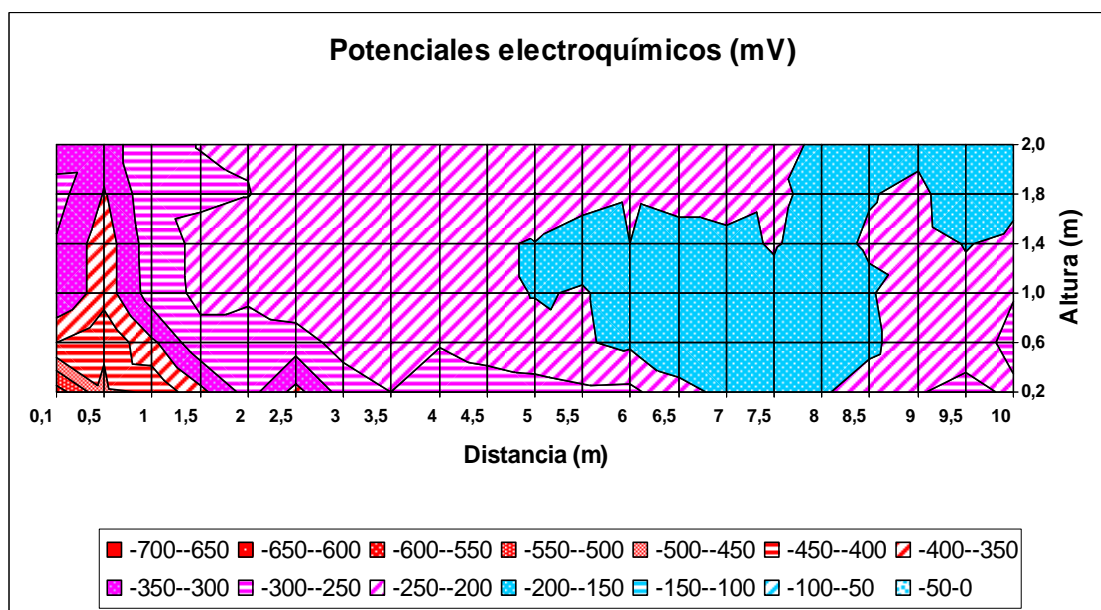
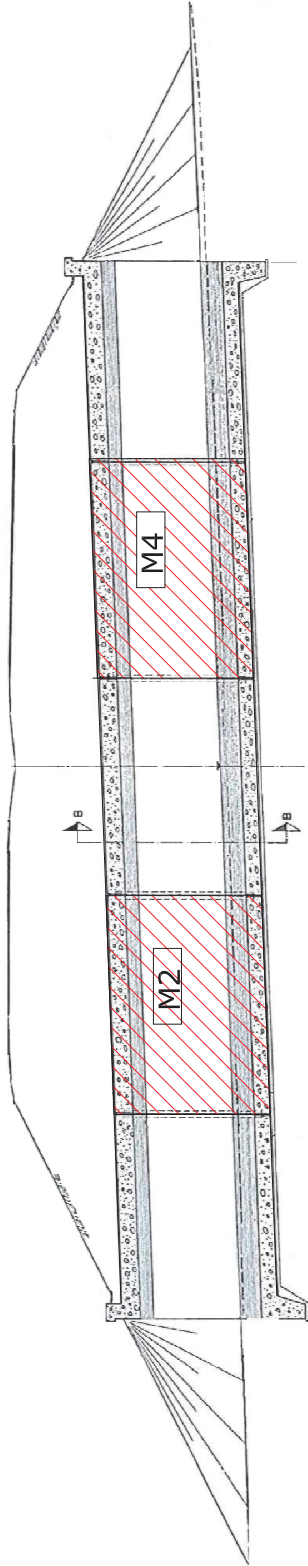
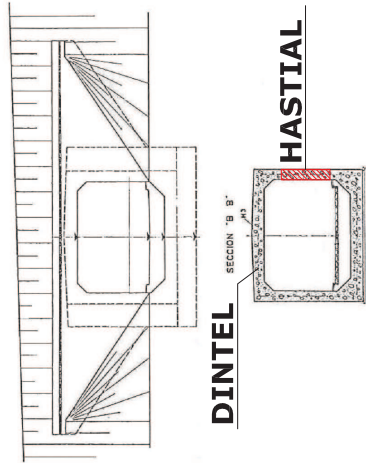


Figura 27. Muestra 11. Zonas de baja actividad y de incertidumbre.

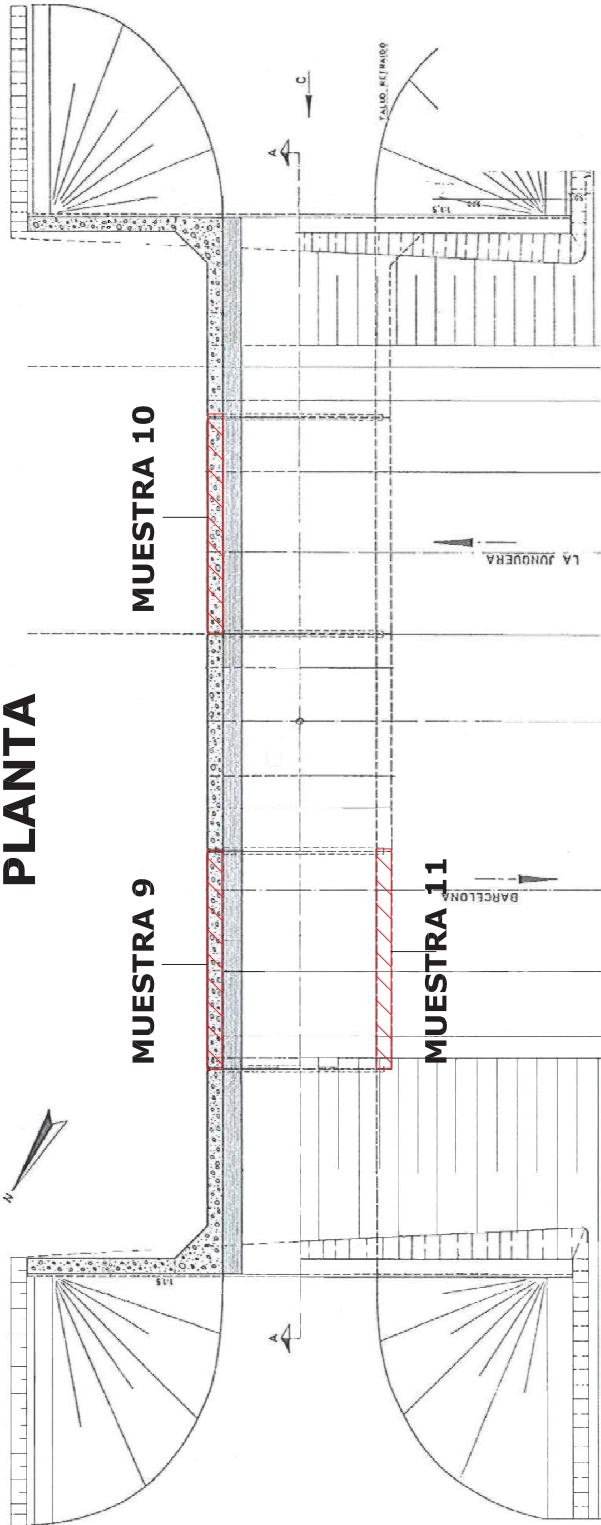
SECCIÓN A-A



ALZADO POR C



PLANTA



UAB Universitat Autònoma de Barcelona	AUTOR DEL PROYECTO MIGUEL OLEA ARRANZ	TÍTULO DEL PROYECTO HORMIGÓN ARMADO: DURABILIDAD, MEDIDAS DE POTENCIALES DE CORROSIÓN COMO ELEMENTO DE CONTROL DEL ESTADO DE LAS ARMADURAS	ESCALA  GRÁFICA	NOMBRE DEL PLANO: O.F. - 7131298 PLANTA Y ALZADOS	FECHA: ENERO 2011 PLANO NÚM. 03

Estructura 4 .Se trata de un viaducto que vuela sobre el río Ripoll y que permite el paso sobre él a la autopista. Consta de un tablero de cinco vigas que apoyan sobre cuatro pilares y dos estribos. La muestra se realiza en el pilar nº2. La toma de potenciales coincide con obras de conservación del tablero.

Plano nº4; Fecha= 28/07/2010; T=27°C; HR_{MEDIA}=63%

○ **Muestra 12**

La muestra se realiza en el pilar nº 2. Este pilar fue protegido frente a la carbonatación con un recubrimiento protector de mortero acrílico de 2 mm de espesor y una capa de pintura también acrílica en el año 1994, debido a la presencia de desconchados y armadura oxidada en la zona del capitel y a la presencia de pequeñas fisuras en el pilar ($e < 0,2$ mm). También se detectó entonces, en algunos puntos donde el recubrimiento era escaso, que la carbonatación llegaba hasta los cercos de armadura de los pilares.

Para la determinación de los potenciales en esta muestra, se ha retirado parte del revestimiento protector del pilar. Una vez descubierta la superficie de hormigón, se han tomado los potenciales cuyo mapa corresponde al mostrado a continuación. (Figura 28).

Las medidas de potencial realizadas indican que no existen zonas activas con posibilidad de corrosión.

Se ha medido de nuevo el espesor de carbonatación en el pilar (Figura 29) observando que es de 1,4 cm siendo el recubrimiento medido de entre 2 y 2.5 cm. Estos valores de carbonatación coinciden con los obtenidos en el año 1994. Se puede comprobar que la protección anti-carbonatación realizada en el año 1994 ha sido positiva, en el sentido que ha frenado su avance y ha impedido que se originen zonas de corrosión de armadura.

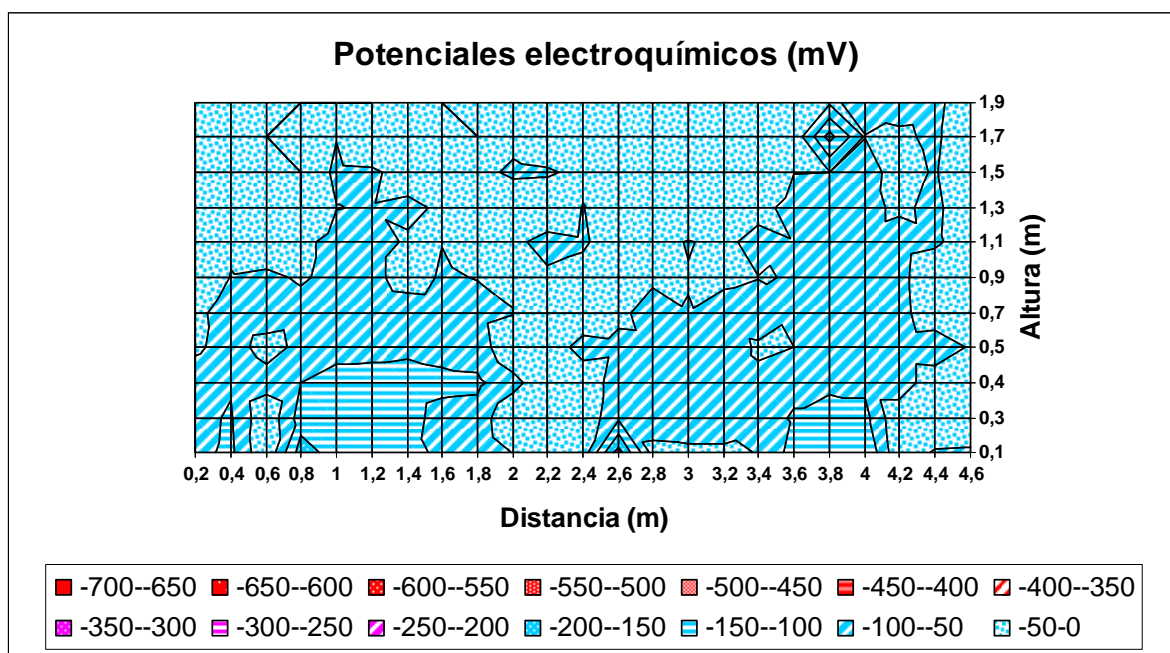
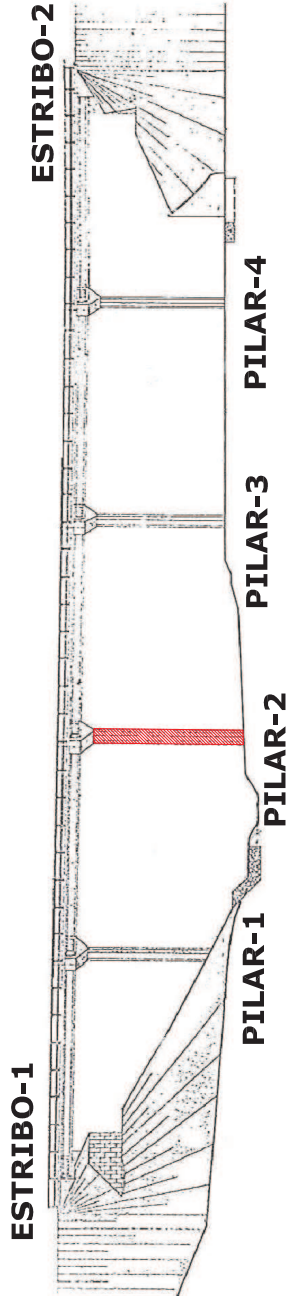


Figura 28. Muestra 12. No se detectan zonas activas.

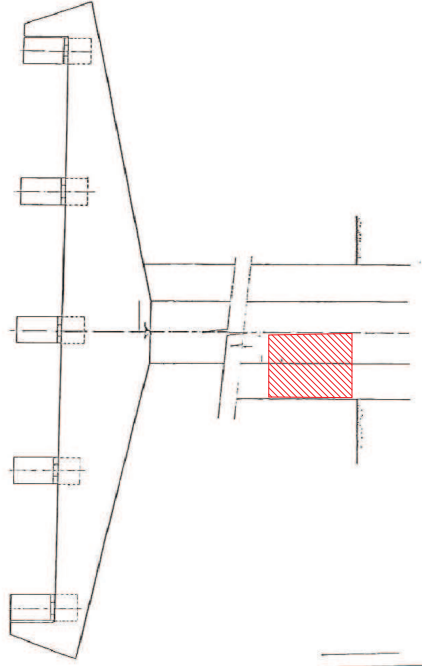


Figura 29. Recubrimiento de las armaduras y frente de carbonatación. No hay corrosión de armaduras.

ALZADO



PILAR



PLANTA

