

Estructura 5. Se trata de un viaducto que vuela sobre el río Llobregat y que permite el paso de la autopista sobre él. Consta de un tablero de seis vigas que apoyan sobre veinte pilares y dos estribos. La muestra se realiza sobre los pilares nº 2 de ambas cazadas. La toma de potenciales coincide con obras de conservación del tablero (arreglo de una de sus vigas por impacto de vehículo pesado)

Plano nº 5; Fecha = 2/08/2010; T= 26° C; HR_{MEDIA}= 63%

○ **Muestra 13 y 14,**

Los potenciales obtenidos revelan que en las muestras ensayadas no hay zonas activas. Únicamente se ha encontrado algún punto aislado, con potenciales muy negativos, cercanos al suelo.

Sobre estos puntos se han realizado catas en el hormigón para verificar la oxidación de las armaduras en estos puntos negativos y el resultado de las mismas demuestra que no existe oxidación (Figuras 30).



Figura 30. Cata realizada sobre un punto con valores muy negativos.

Es posible que estos valores negativos estén asociados a la proximidad con el terreno, zonas de humedad- sequedad y estén influenciadas por el diferente grado de humedad en los poros del hormigón.

Los recubrimientos de hormigón medidos en las catas son de 4,5 cm. Respecto a la carbonatación, se comprueban varios puntos, encontrando un frente de carbonatación entre 0,5 cm y 0,8 cm. (Figura 31). El aspecto del hormigón de la estructura en general es muy bueno, observando un hormigón muy compacto. No existen señales de oxidación de armaduras.



Figura 31. Recubrimiento, carbonatación y punto de conexión.

A continuación se muestran los mapas de potencial obtenidos. (Figuras 32 y 33)

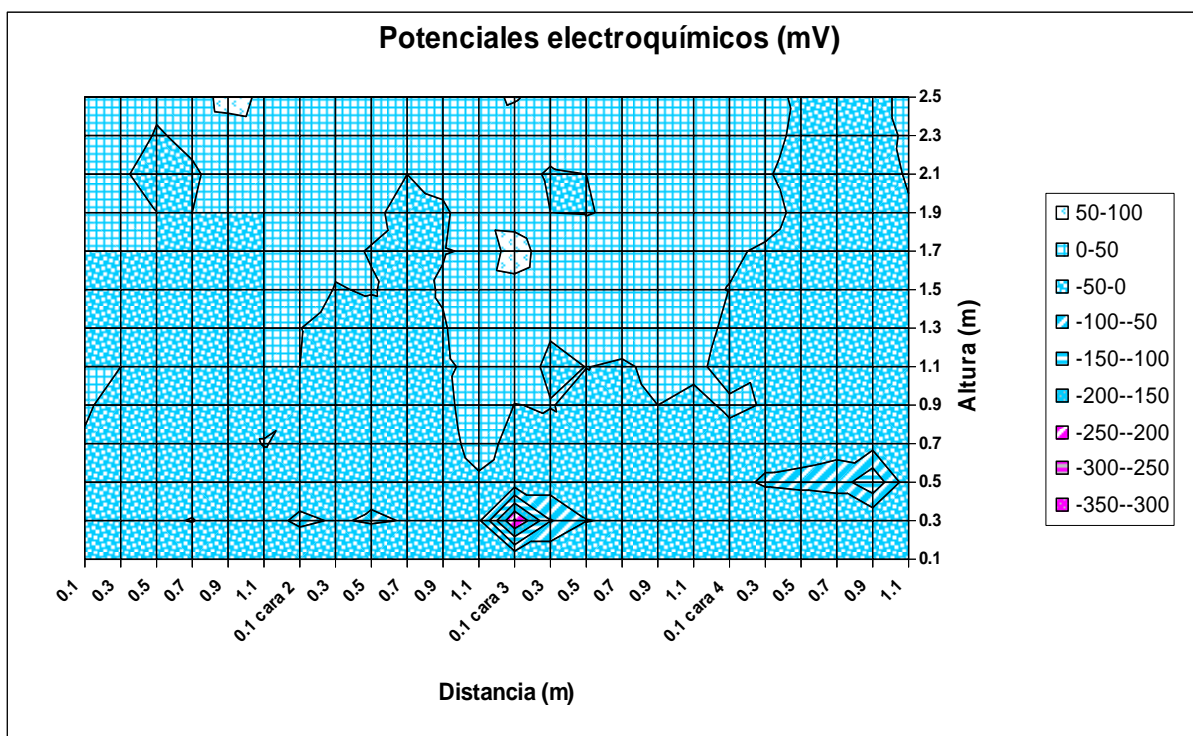


Figura 32. Muestra 13. No hay zonas de actividad. Caras 1 a 4

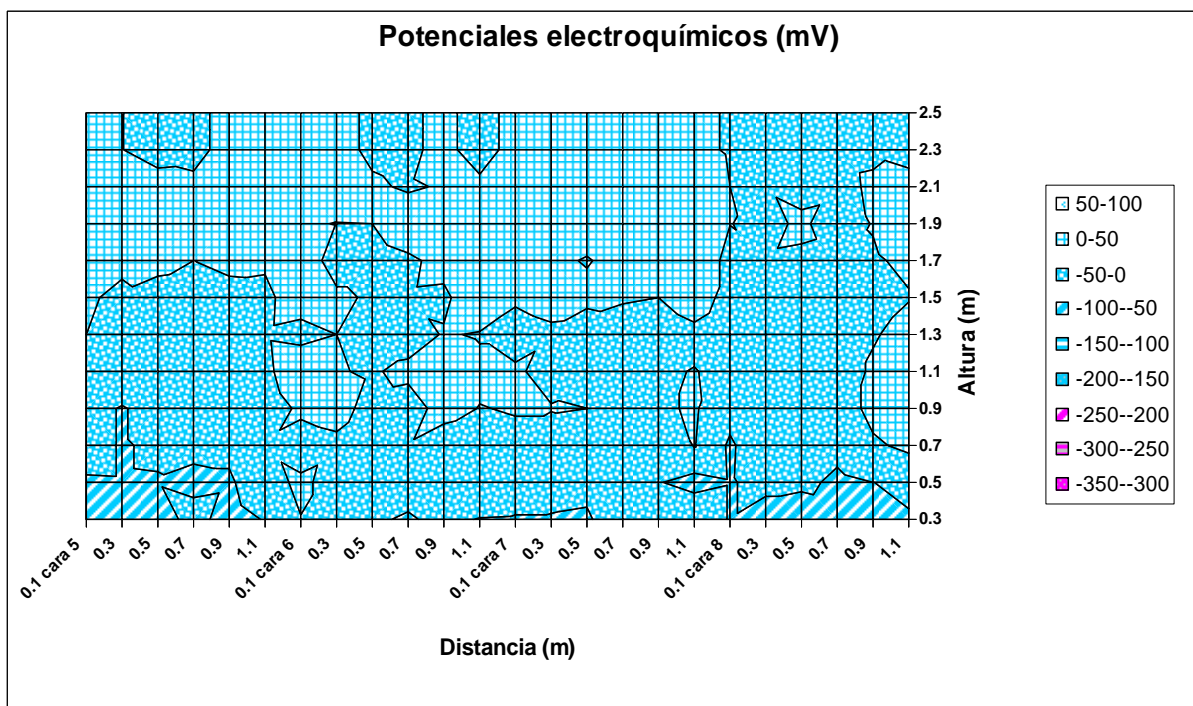
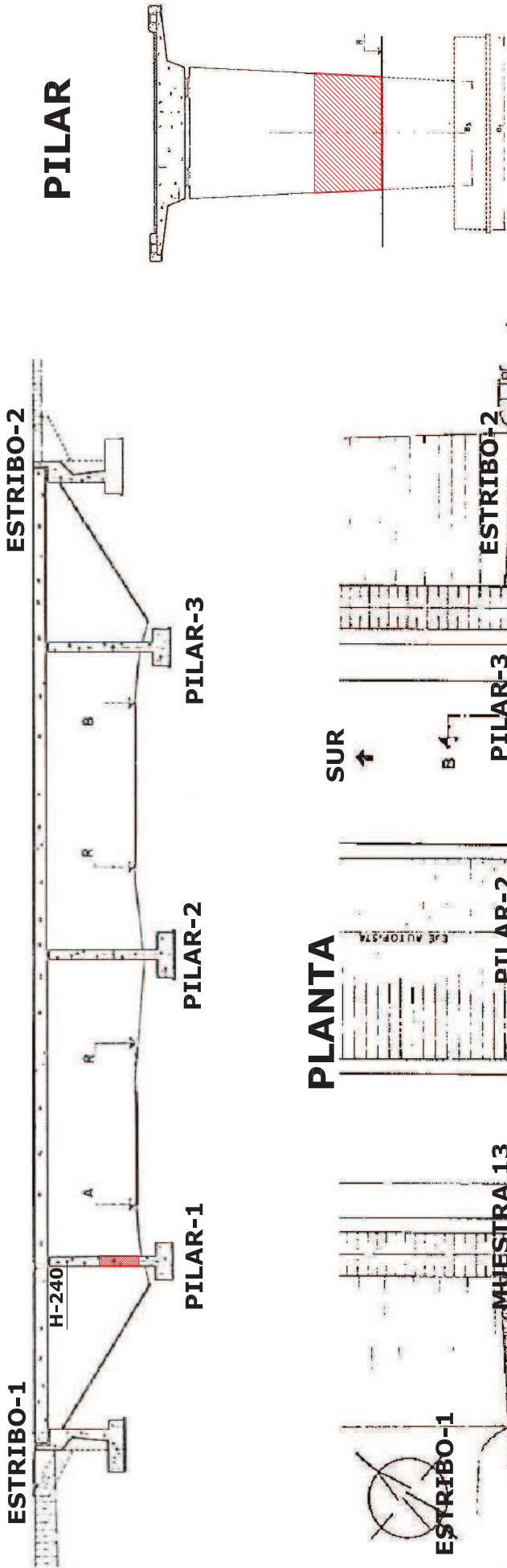


Figura 33. Muestra 13. No hay zonas de actividad. Caras 5 a 8

ALZADO



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.- 7166295 PLANTA Y ALZADOS	FECHA: ENERO 2011 PLANO NÚM. 05

Estructura 6 Se trata de un puente situado a 2,5 km de la costa aproximadamente en la provincia de Tarragona. El puente consta de un tablero de vigas de dos vanos que apoya sobre unos pilares centrales y los estribos. Este puente permite el paso a la autopista sobre una autovía que la cruza. El entorno es rural y próximo al mar. 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 nº 6; Fecha =26/07/2010; T= 28° C a 32°C; HR_{MEDIA}=62%

○ **Muestras 15, 16 y 17**

Esta estructura próxima a la costa, presenta armaduras oxidadas con desconchados de hormigón en las zonas de entrevigado, tanto en los cargaderos del estribo como en el cargadero de los pilares. En estas zonas se observan humedades que ponen de manifiesto la entrada de agua de escorrentía a través de las juntas del tablero. El agua discurre por los paramentos de hormigón en época de lluvia que colmata los poros volviendo a secarse en épocas de estío. La humedad ambiente durante el año es alta. Se observan corrosiones importantes en las armaduras cercanas a las zonas de juntas de tablero y de estribo (escorrentía) También se observa un recubrimiento muy escaso de hormigón. En el caso de las vigas y sobre el cargadero de los pilares se miden recubrimientos en el alma de 1cm escaso, presentando oxidación la armadura de piel. Los potenciales medidos en las muestras sobre zonas con signos de oxidación, han sido los que se indican a continuación. (Figuras 34, 35, 36, 37y 38)

Los potenciales medidos no son muy negativos a pesar de ser una estructura próxima al mar. Los valores muestran zonas de incertidumbre amplias Tampoco se observa ninguna tendencia salvo en las medidas de potencial realizadas en una zona de 2m de longitud de viga desde el extremo, E<-300, hacia el centro de viga E<-130mV. (gradiente de potenciales). La zona con potenciales más negativos (extremo de la viga) coincide con la zona donde se observa corrosión con desconchados del hormigón. El recubrimiento de las armaduras es muy escaso. (1 cm).

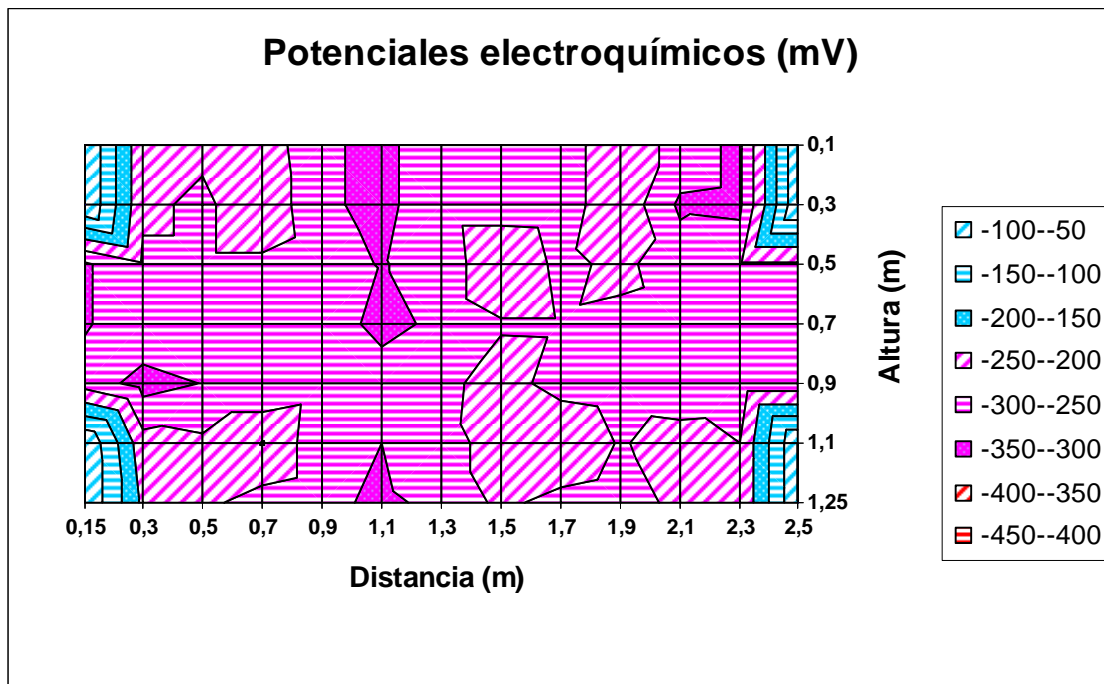


Figura 34. Muestra 15 Mapa de potenciales. EV1-2

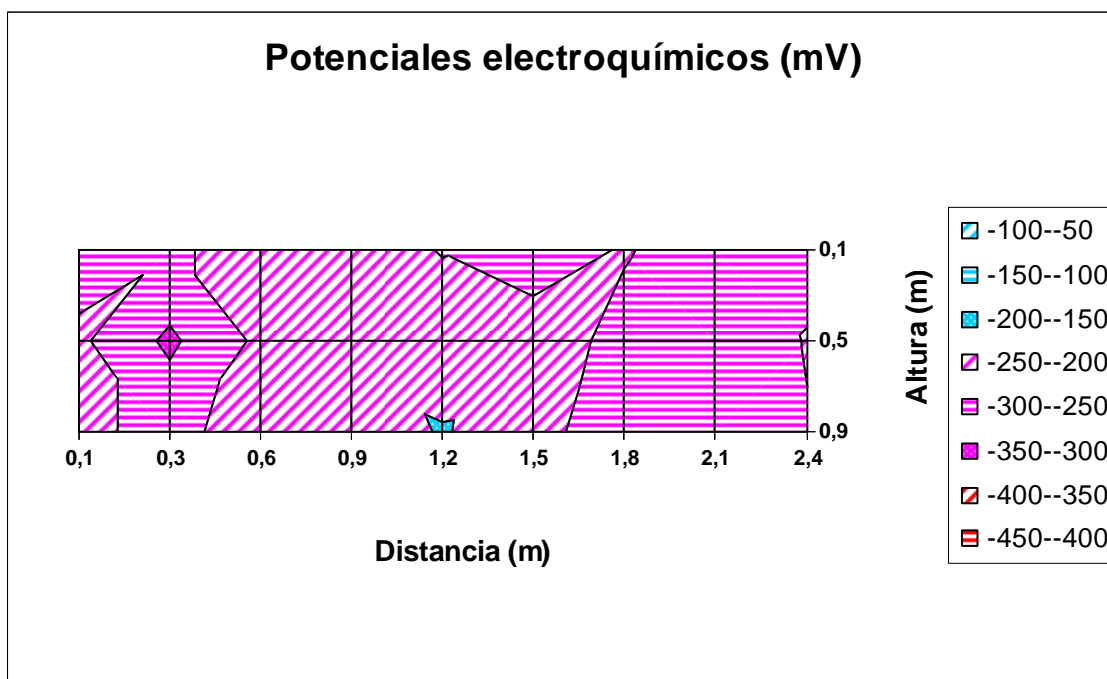


Figura 35. Muestra 15 Mapa de potenciales. E1-2

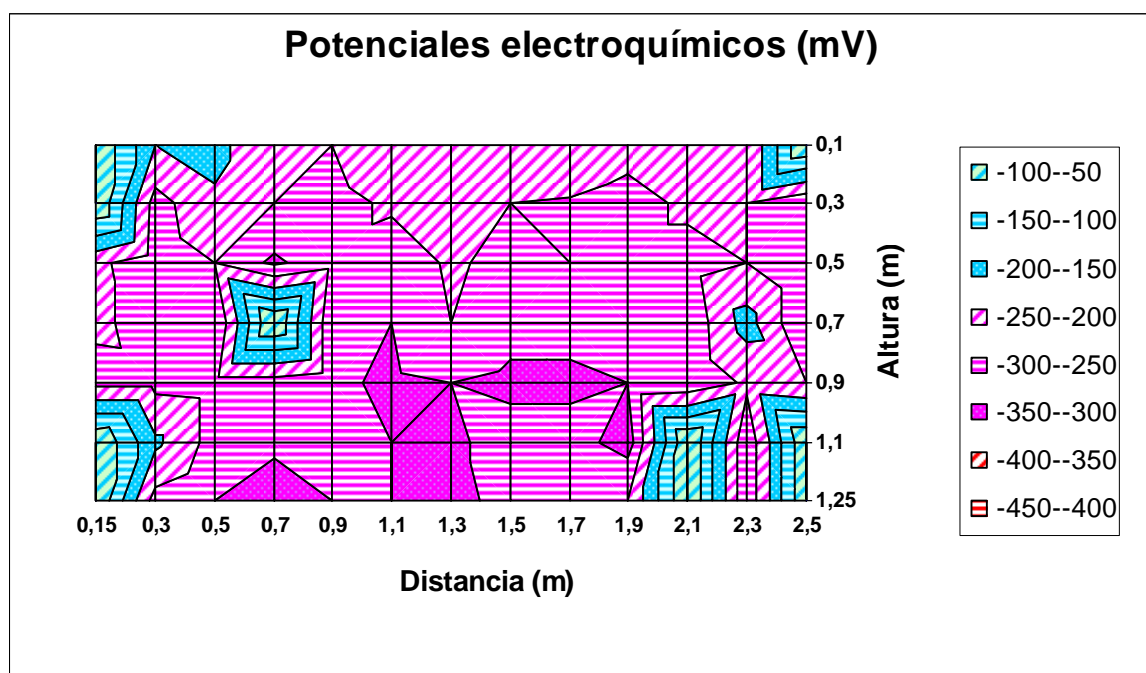


Figura 36. Muestra 16 Mapa de potenciales. EV2-3

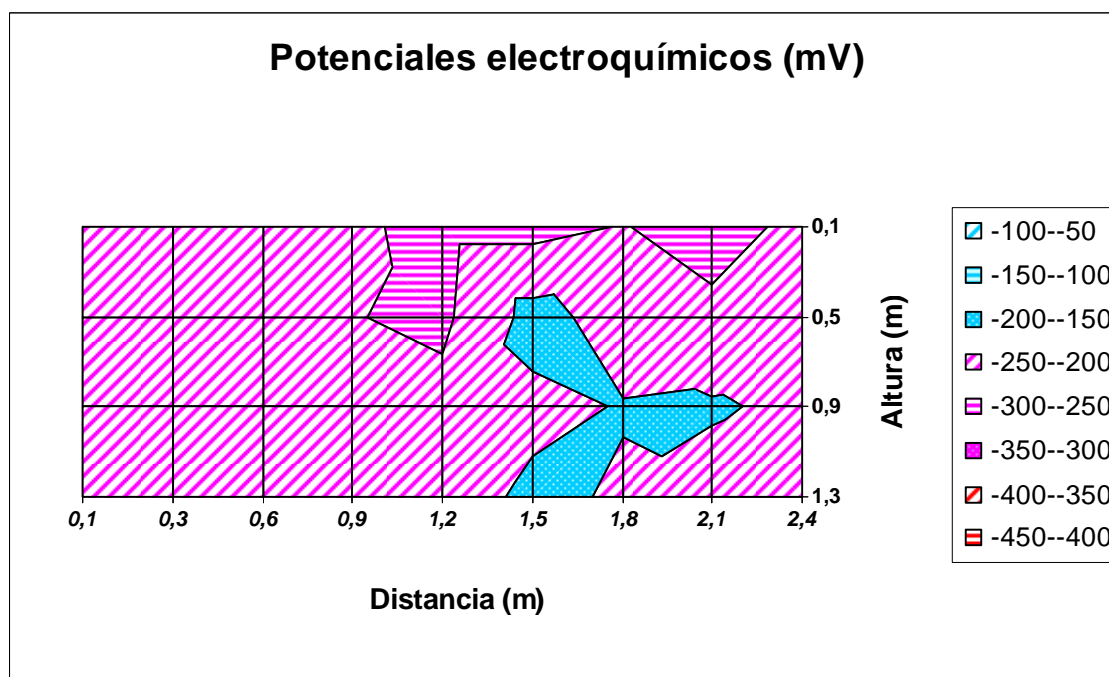


Figura 37. Muestra 16 Mapa de potenciales. E2-3

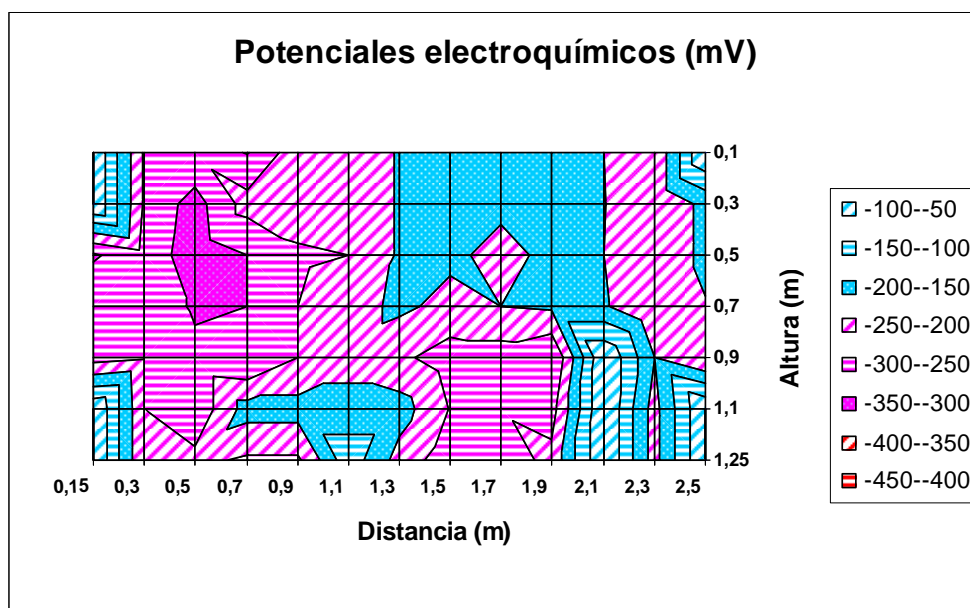
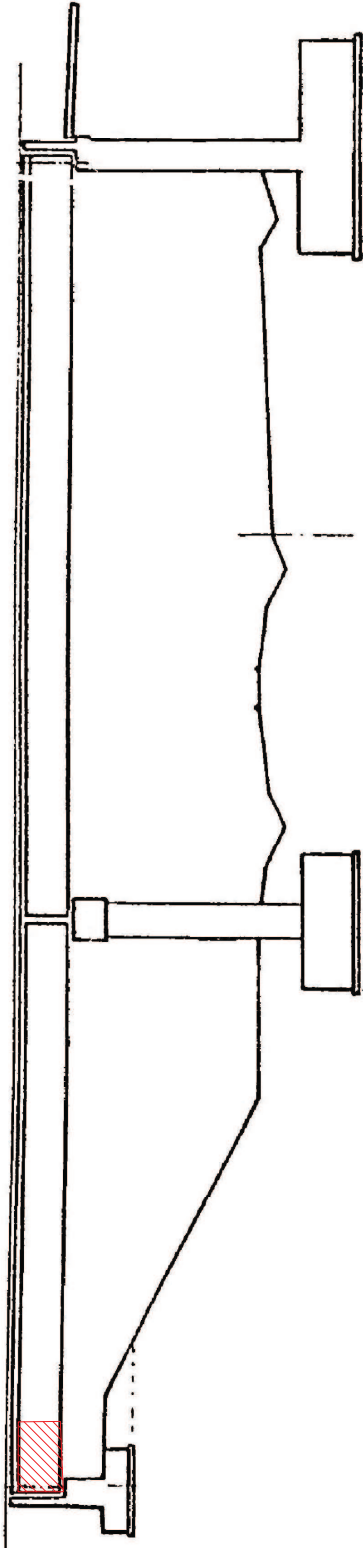


Figura 38. Muestra 17 Mapa de potenciales. EV3-4

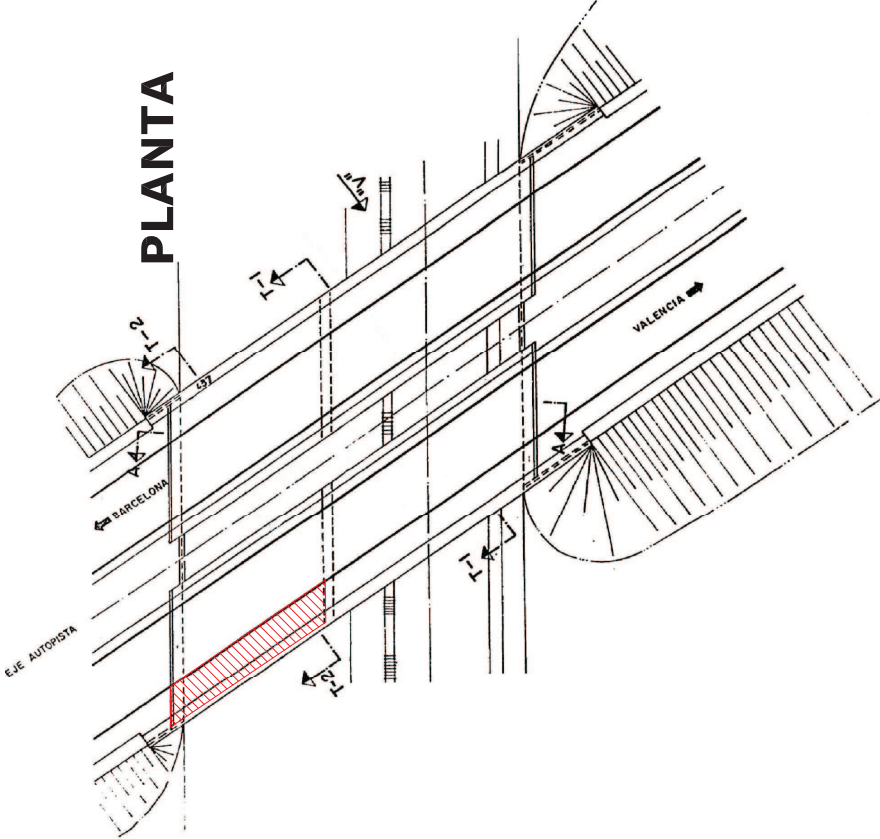


Figura 38. Aspecto de las pilas y cargadero

SECCIÓN A-A



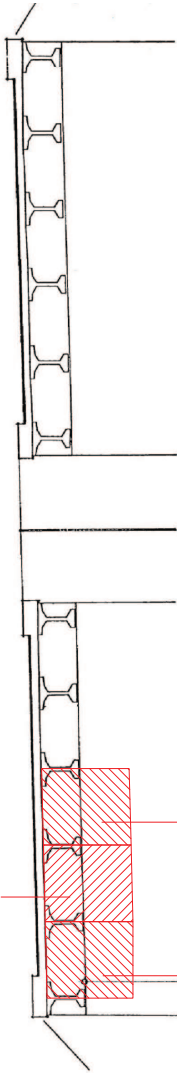
PLANTA



TABLERO 2

MUESTRA 16

MUESTRA 15 MUESTRA 17



 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.- 7237395 PLANTA Y ALZADOS	FECHA: ENERO 2011 PLANO NÚM. 06

Estructura 7 Se trata de un pórtico abierto que permite el paso de un camino rural bajo la autopista. El entorno es rural y su clima continental. *Plano n° 7; Fecha = 04/08/20010; $T=34^{\circ}\text{C}$; $HR_{\text{MEDIA}}=58\%$.*

○ **Muestra 18 y 19**

La estructura presenta una zona de oxidación en la zona en contacto con el suelo. Visualmente el resto del hormigón presenta buen aspecto sin que se observen otras manifestaciones de oxido. Se observan fisuras de retracción en los muros verticales. Los mapas de potencial se vuelven muy negativos en las zonas próximas al suelo, donde ya aparecen manifestaciones de corrosión en forma de pequeños desconchones en el pie de hastial. El recubrimiento de hormigón en esta zona es muy escaso, apareciendo alguna zona de armadura prácticamente al aire. La carbonatación del hormigón es de 0.5 cm.

Los mapas de potencial obtenidos muestran una tendencia clara. Los valores se hacen cada vez más negativos conforme descendemos en cota. En las dos muestras realizadas, el resultado ha sido el mismo. Los valores de potencial han llegado a la zona de incertidumbre con valores entorno a los -300mV, con una zona importante (zonas altas) donde no se detecta actividad, máxime, si tenemos en cuenta que la cota sobre la medida es aún tres metros más hasta completar la altura del pontón.(Figuras 39).

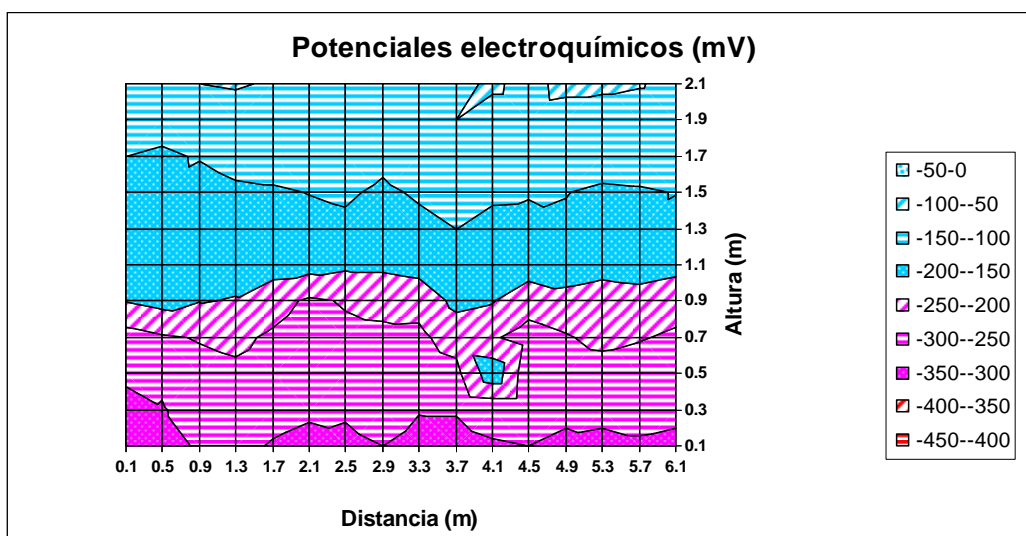
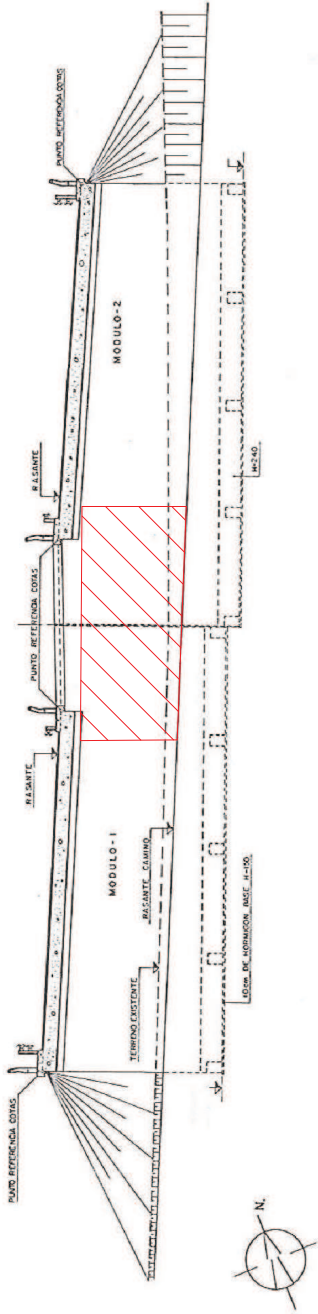


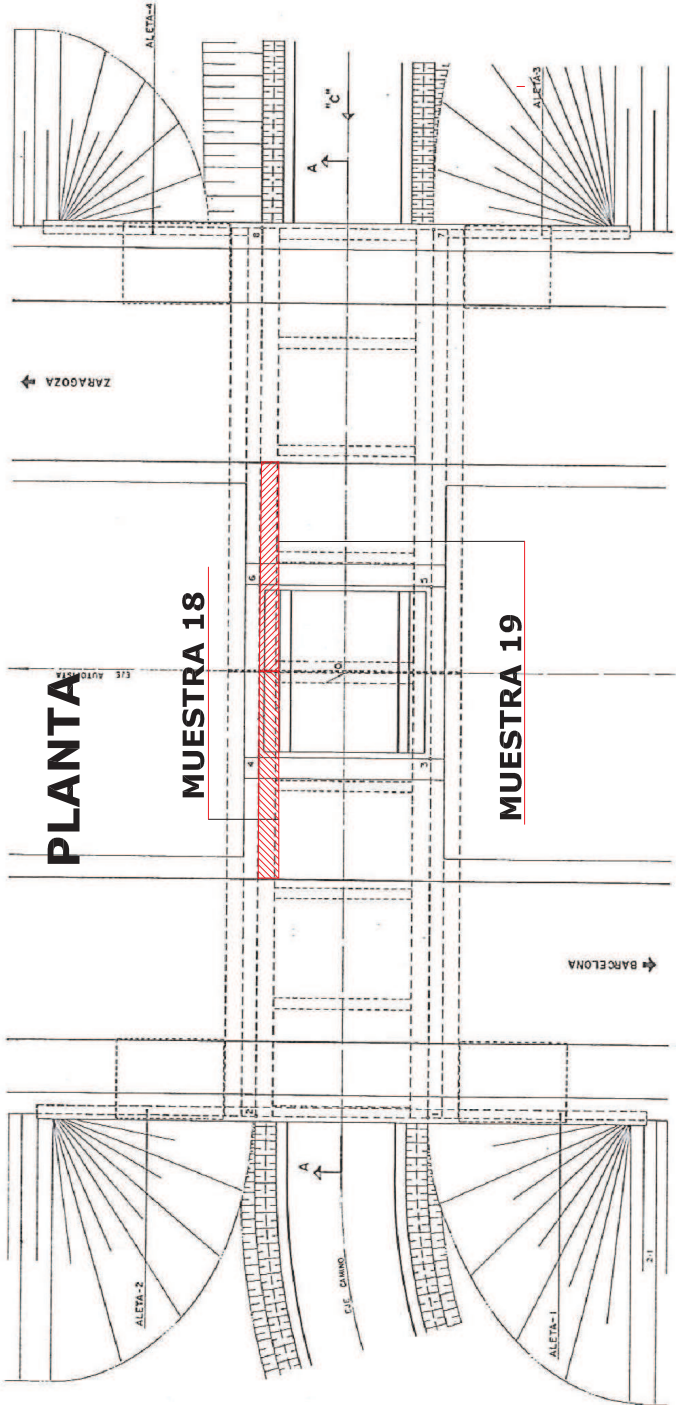
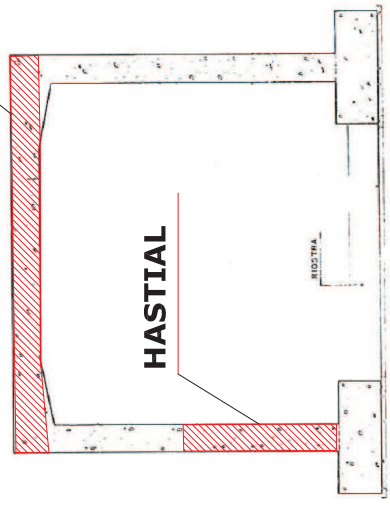
Figura 39. Muestra 18 y 19. Mapa de potenciales.

ALZADO



SECCIÓN

DINTEL



<div>UAB</div> <div>Universitat Autònoma de Barcelona</div>	AUTOR DEL PROYECTO	TÍTULO DEL PROYECTO HORMIGÓN ARMADO: DURABILIDAD, MEDIDAS DE POTENCIALES DE CORROSIÓN COMO ELEMENTO DE CONTROL DEL ESTADO DE LAS ARMADURAS	ESCALA	NOMBRE DEL PLANO:	FECHA: ENERO 2011
	MIGUEL OLEA ARRANZ			O.F.- 2175758 PLANTA Y ALZADOS	PLANO NÚM. 07

Estructura 8. Se trata de un paso sobre la autopista que consta de un tablero hiperestático que apoya sobre tres pilas y dos estribos. El entorno es rural y su clima templado.

Plano nº8; Fecha= 05/08/2010; T=34°C; HR=58%

○ **Muestra 20, 21 y 22**

Los potenciales medidos sobre las muestras 20, 21 y 22 coinciden con la inspección visual de las mismas. En la muestra 22 se puede observar, a simple vista, una zona de armadura al aire y oxidada (cerco) en la parte inferior de la muestra. Esta zona de corrosión, se sitúa en la zona próxima a la tierra. (Figura 40). Se muestran también los mapas de potenciales correspondientes (Figuras 41 y 42). Se ha aprovechado la zona oxidada para realizar el contacto con la armadura. Señalar que a partir de muy poca altura desde el suelo los potenciales tienden a ser positivos como lo reflejan los mapas de potencial obtenidos. Salvo la zona corroída del pié del pilar el resto de hormigón se presenta en muy buen estado.



Figura 40. Muestra 22 Aspecto de la muestra.

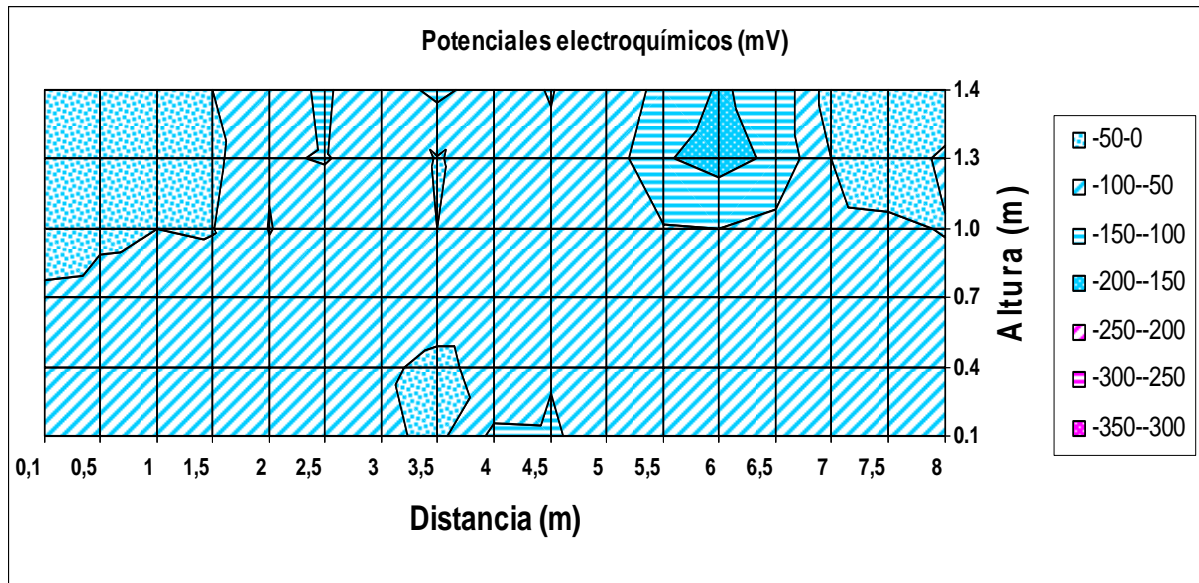


Figura 41. Muestra 20 Mapa de potenciales.

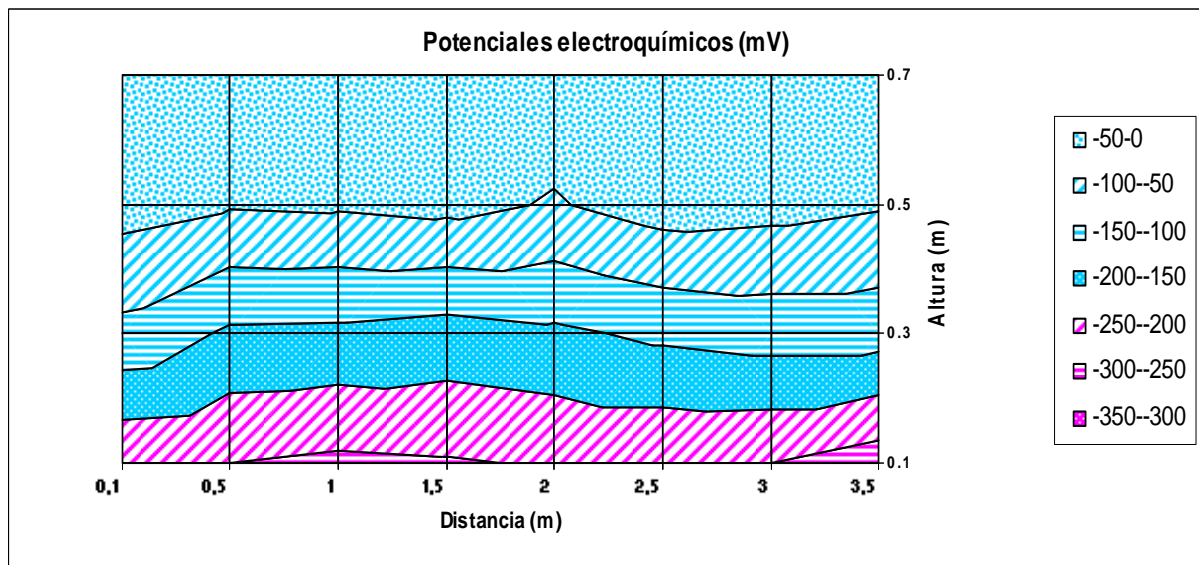
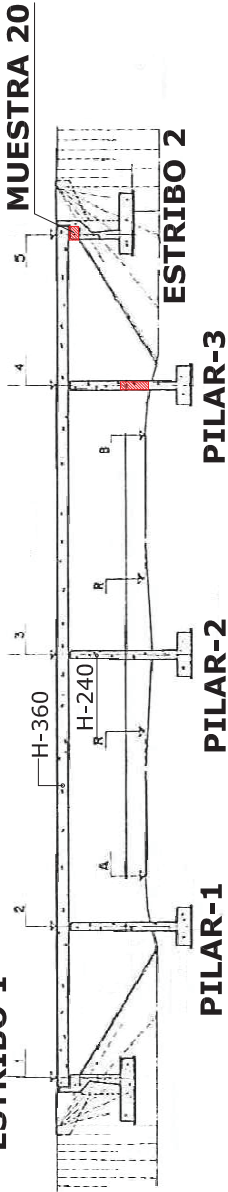


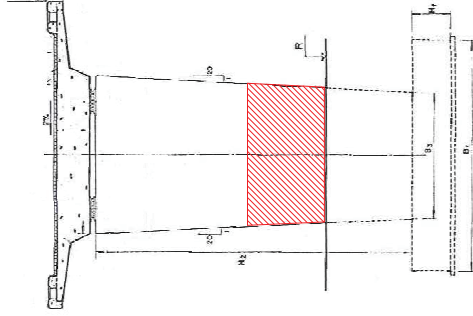
Figura 42. Muestra 22 Mapa de potenciales.

ALZADO

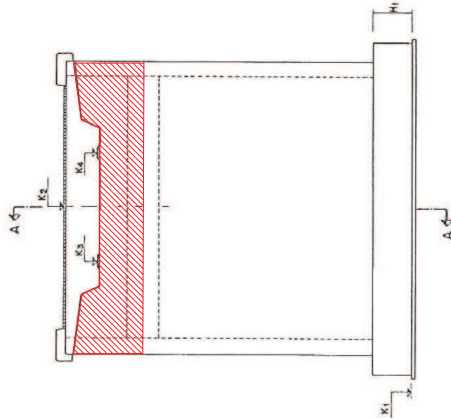
ESTRIBO 1



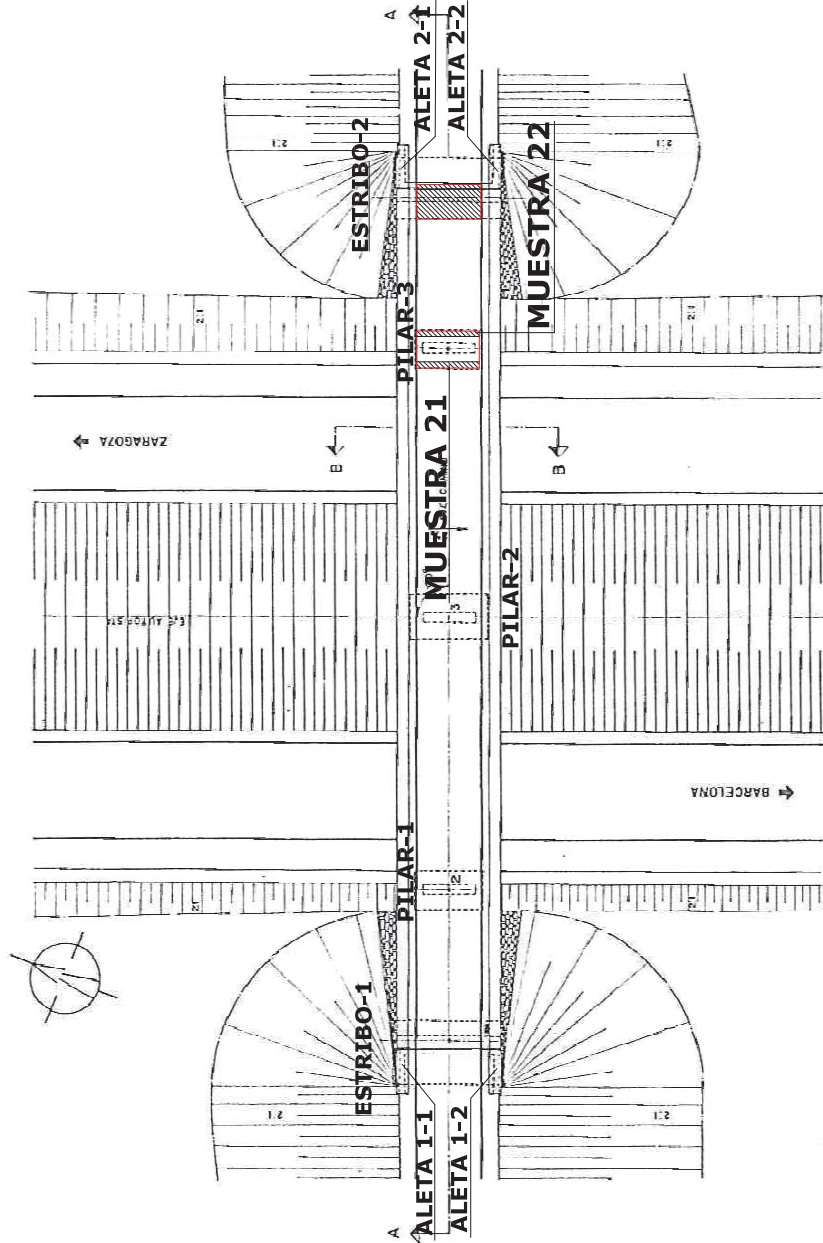
PILAR



ESTRIBO



PLANTA



Estructura 9 Se trata de un paso sobre la autopista que consta de un tablero hiperestático que apoya sobre tres pilares y dos estribos. El entorno es rural y su clima templado.

Plano nº9; Fecha= 05/08/2010 T=32°C HR_{MEDIO}=58%.

○ **Muestra 23, muestra 24, muestra 25 y muestra 26**

Igual que en el caso anterior, los potenciales medidos sobre las muestras 23, 24, 25 y 26 coinciden con la inspección visual de la misma. En esta muestra se puede observar a simple vista, una zona de armadura al aire y oxidada (un cerco) en la parte inferior. Esta zona de corrosión se sitúa en la zona próxima a la tierra. Se muestran también los mapas de potenciales correspondientes. (Figuras 43, 44, 45 y 46).

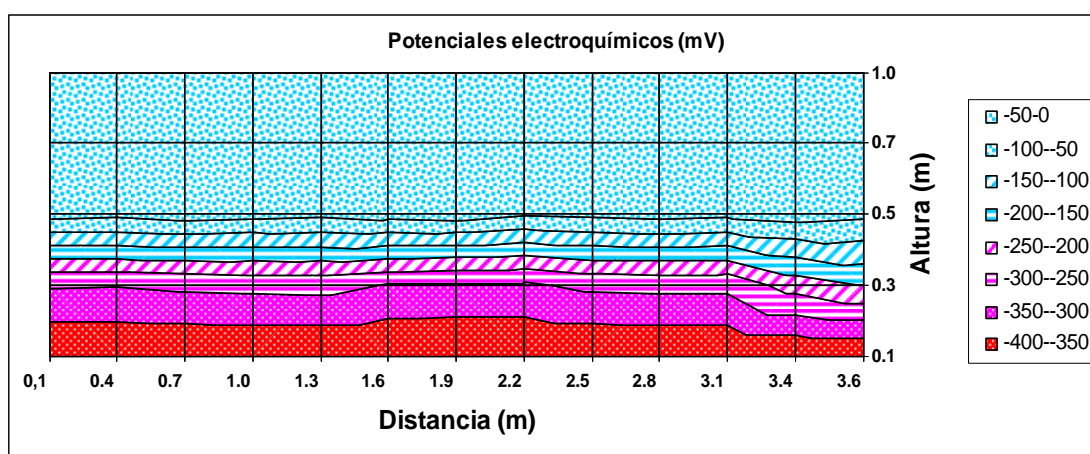


Figura 43. Muestra 23. Mapa de potencial. Corrosión de armadura en parte inferior.

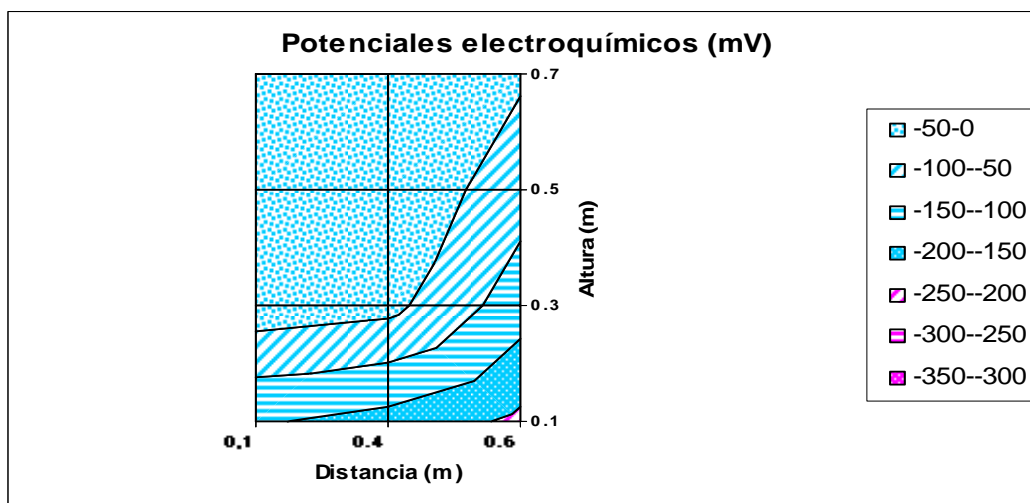


Figura 44. Muestra 24. Mapa de potencial No existen zonas activas.

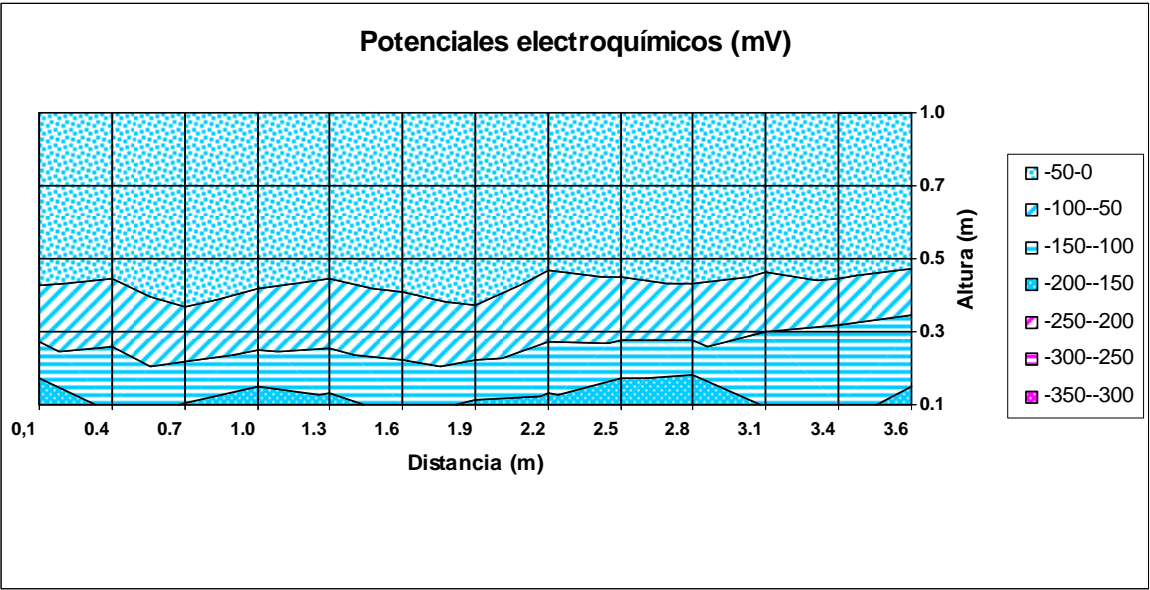


Figura 45. Muestra 25. Mapa de potencial No existen zonas activas

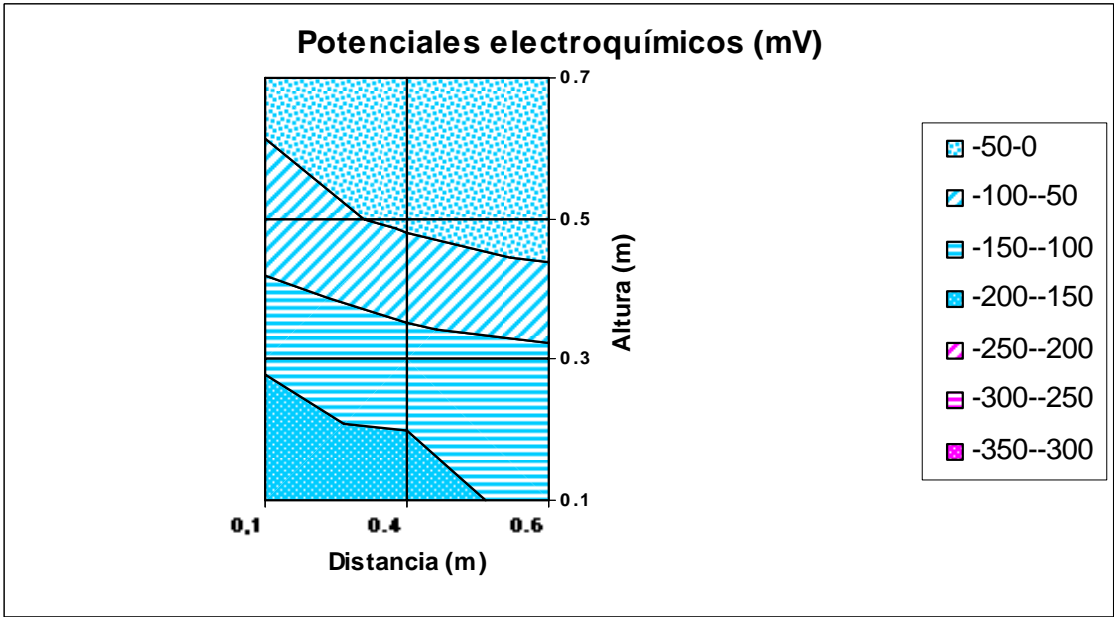
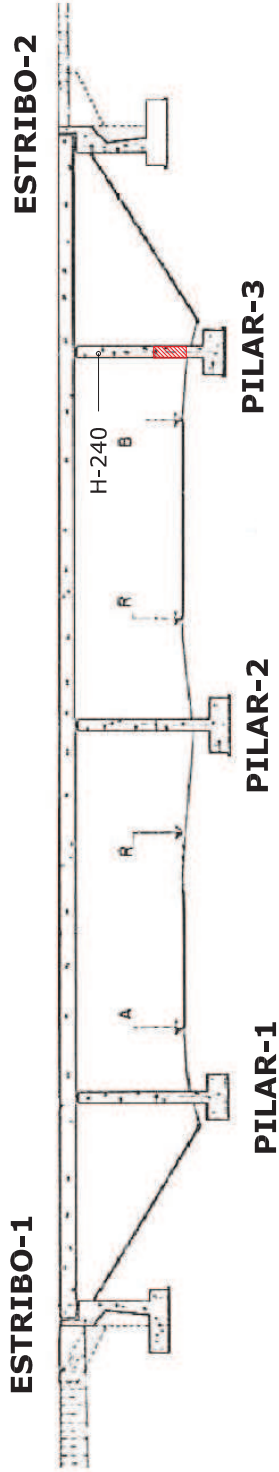
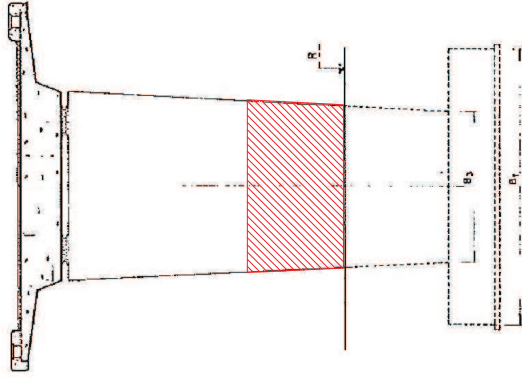


Figura 46. Muestra 26. Mapa de potencial No existen zonas activas

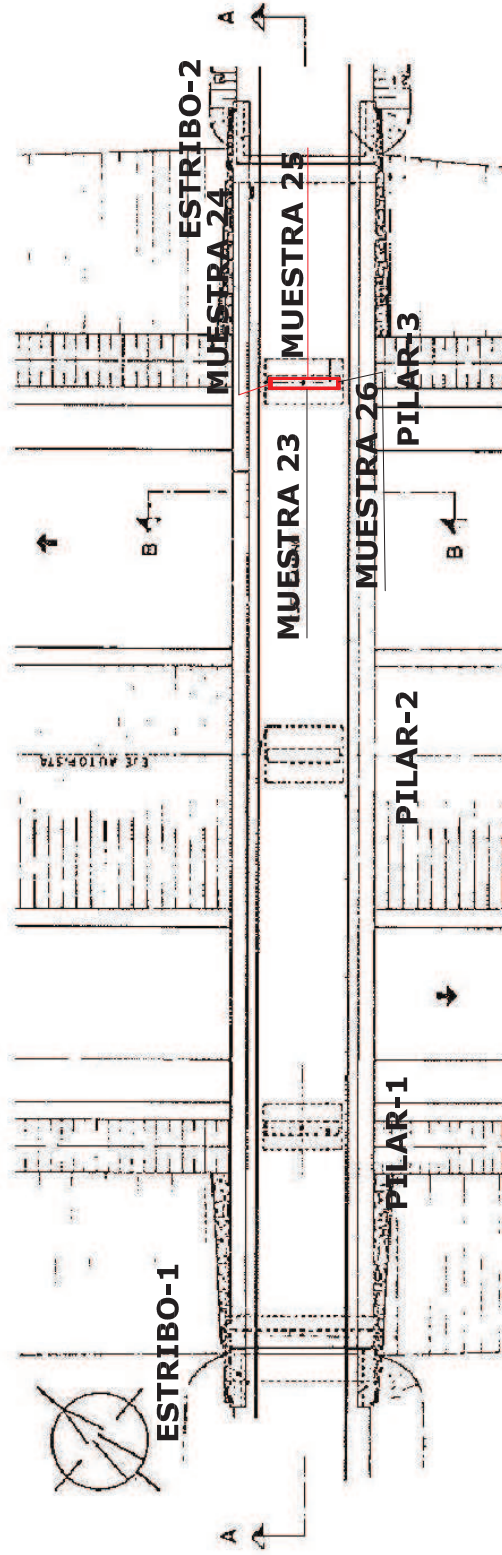
ALZADO



PILAR



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
---	--	--	------------

Estructura 10: Caso especial Silo de sales de deshielo.

o Muestra 27

La muestra 27 es el muro perimetral de cierre de un silo de sales de deshielo. El silo es de planta circular y estructura metálica. El edificio está concebido para almacenar las sales que se emplean como fundentes en las campañas invernales de las carreteras. El material almacenado, sales de cloruro potásico y sódico, en contacto con el hormigón y con los elementos metálicos de la estructura, desencadenó un proceso de corrosión por el ingreso de iones cloruro en la masa del hormigón.

Esto hizo que en el año 2010 fuera objeto de una rehabilitación, que a grandes rasgos consistió en:

- Saneamiento de las zonas degradadas del hormigón del muro perimetral (zonas donde el óxido de las armaduras había causado grietas y fisuras).
- Limpieza con chorro de arena.
- Pasivado de las armaduras descubiertas, con pintura epoxi-cinc (figura 47)
- Aplicación de capa puente sobre el hormigón viejo y regeneración de las zonas saneadas con mortero hidráulico de cemento con resinas de tipo acrílico.
- Aplicación de un inhibidor de superficie
- Protección de pintura epoxi para evitar el contacto de la sal con el muro de hormigón.
- Saneamiento y protección de los elementos metálicos que forman la estructura.
-

Antes del comienzo de la obra, se tomaron potenciales del muro, tanto en el interior como en el exterior, obteniendo unos valores de potencial que oscilaban entre los -650 mV y los -550 mV.



Figura 47. Aspecto del interior del silo. Saneo y pasivado de las armaduras.

Estos potenciales se obtuvieron tanto fuera como dentro del edificio. Durante las reparaciones, se fueron tomando potenciales sin obtener variaciones significativas en las mediciones. Finalmente terminada la obra, y protegidos todos los paramentos, se volvieron a tomar potenciales. Para esto se dejaron conexiones fijas a la armadura que permitían realizar lecturas de potenciales sin necesidad de romper el sistema de protección del hormigón. Los resultados de las lecturas han sido los mismos que las originales. Los valores próximos a -600mV se repiten en toda la superficie.

Es necesario en este caso analizar la influencia que tiene la estructura metálica sobre el conjunto del armado del hormigón, que al ser una relación muy baja, puede ocurrir que zonas anódicas ocultas polaricen al resto de la estructura. También es posible que las zonas saneadas sean demasiado pequeñas respecto a las zonas de hormigón contaminado y esto haga que los potenciales no varíen.

En cualquier caso las lecturas tomadas son coherentes con la teoría. La presencia de ión cloruro, por encima de un determinado valor genera valores muy negativos de potencial.

En esta estructura y fuera del ámbito de este proyecto, se determinó el contenido de cloruro según norma UNE 83827/94 por un laboratorio externo. El resultado obtenido constata que a valores de potencial muy negativos corresponden contenidos muy altos de ión cloruro en la masa del hormigón

Se acompaña mapa de potenciales obtenido antes de la reparación (Figura 47).

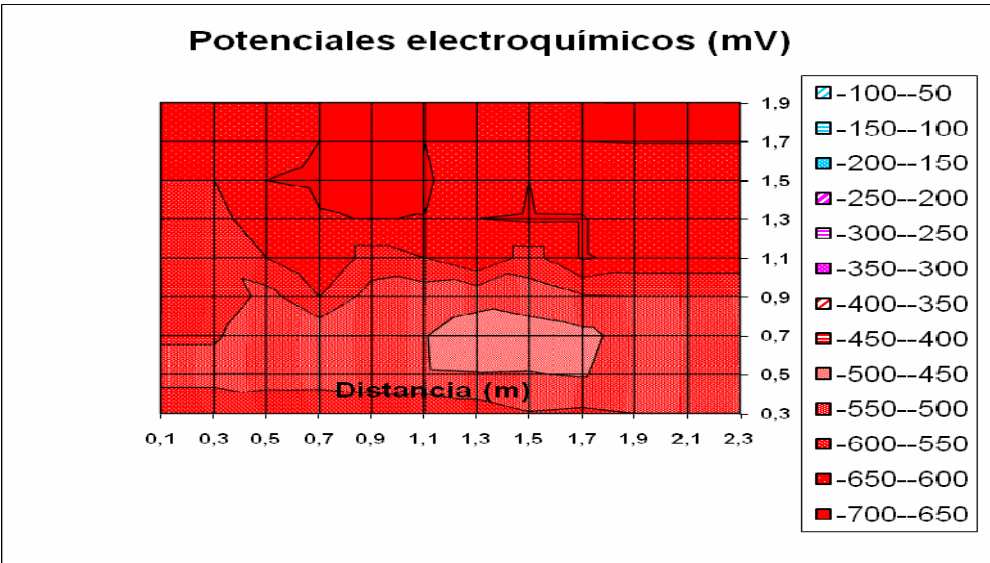


Figura 47: Muestra 27. Existencia de iones cloruro en el hormigón.

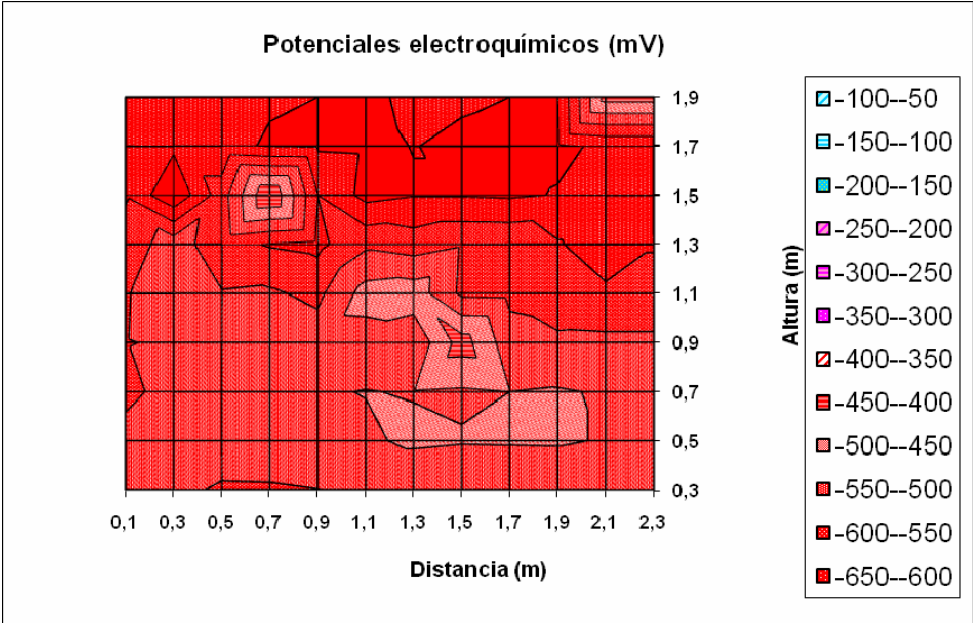


Figura 48: Muestra 27. Después de reparar

Como se ha dicho anteriormente, el silo fue reparado y protegido finalmente con un inhibidor de corrosión (carboxilatos). Este inhibidor se aplicó sobre la superficie del hormigón en el mes de abril de 2010, quedando pendiente un estudio de la difusión de este material en el hormigón y si hay o no variación en las lecturas de potencial.

5. Conclusiones

Las conclusiones a las que se ha llegado han sido:

- ❖ Las lecturas obtenidas por el método son coherentes con los daños y defectos existentes en la realidad y por tanto el sistema de ensayo propuesto suponen un buen método para determinar las posibles zonas activas
- ❖ Los potenciales muy negativos, valores más negativos de -500 mV, corresponden a estructuras con presencia de ión cloruro en grandes proporciones. Esto se ha constatado en el silo reparado y contrastado con otro silo de fundentes. Los niveles medidos en laboratorio de ión cloruro dentro de la masa del hormigón ha sido del 0,17% sobre el peso de la muestra que representa el 1,23 % respecto al peso de cemento
- ❖ En las muestras realizadas en estructuras cercanas al mar, no se han detectado valores negativos altos que hagan pensar en un contenido anómalo de ión cloruro. Es posible que la entrada de ión cloruro en las estructuras sea más importante por las sales de deshielo que por los cloruros en el aire y en el agua de condensación.
- ❖ Por regla general, las lecturas más negativas obtenidas en las diferentes muestras, salvo en el caso de la muestra "silo" (caso especial por su contenido de cloruros) han estado en valores entre -300mV a -250 mV. Para estos valores las catas realizadas han determinado la existencia de corrosión en las armaduras descubiertas. Es posible que los rangos de valores dados por la norma americana tengan que ajustarse a las condiciones existentes en Cataluña, clima mediterráneo, donde el uso de sales de deshielo es mucho menor que en determinados estados americanos.

Lo ideal sería poder realizar catas en las zonas más activas con el fin de ajustar el umbral de valores.

- ❖ Los hormigones que presentan una buena resistencia (chequeo a percusión con martillo) y una buena compacidad (pocos poros vistos) presentan valores de potenciales por el método de la media pila altos e incluso llegan a dar valores positivos entre 0mV y 50 mV.
- ❖ A través de las medidas de potencial podemos determinar, a pesar del reducido número de muestras realizado, dónde se sitúan las zonas más activas dentro de las diferentes partes de un puente. Prácticamente la totalidad de las muestras presentan potenciales muy negativos en las zonas próximas al suelo, cosa lógica si tenemos en cuenta la mayor facilidad de corroerse las zonas aireadas contiguas a zonas donde el oxígeno es escaso (enterradas). También las muestras de la estructura nº6, presentan valores muy negativos en las zonas por donde discurre el agua de escorrentía, zonas bajo las juntas de calzada: cargaderos, pilares y vigas. De esta forma, si tuviéramos que decidir sobre qué partes de un puente debemos actuar para preservarlo de los fenómenos de corrosión, tendríamos que comenzar aislando la parte inferior de los pilares, los paramentos por donde discurre libremente el agua de escorrentía (muros de estribos y cargaderos de pilas) y aislar las cabezas de vigas situadas bajo junta de calzada. Además tendríamos que revisar y mejorar los sistemas de drenaje del puente. Por tanto, el sistema utilizado nos permite determinar las zonas donde tenemos que actuar prioritariamente.
- ❖ De la misma forma en las estructuras semienterradas como los cajones y pórticos abiertos, existe un gradiente de potenciales en los muros verticales. Los valores más negativos de potencial se producen en las zonas bajas de los muros, siendo estas zonas las prioritarias a la hora de proteger la estructura de los procesos de corrosión de armadura.
- ❖ Respecto a la influencia del clima sobre las muestras, comentar que no se han observado diferencias importantes entre las muestras estudiadas.
- ❖ Las medidas de potenciales se ven muy distorsionadas por las capas de protección de pintura y mortero del hormigón. (La resistividad del electrolito aumenta)

- ❖ La complejidad de los materiales empleados en la reparación del hormigón, hace que sea necesario analizar detenidamente la influencia de estos productos sobre las lecturas de potencial. Inhibidores de corrosión del hormigón, de diferentes tipos, pueden hacer descender o aumentar los valores de potencial. Así, se cree necesario realizar un trabajo de investigación que analice y clarifique este tema. Solo en dos de las muestras tratadas se ha detectado un ligero aumento de los potenciales en las zonas reparadas y en un estadio intermedio de reparación, (sobre capas de regeneración con mortero). Después de la protección final con pintura o mortero, las lecturas de potencial no se estabilizan.

El sistema de medidas de potencial por el método de media pila mejoraría si en la construcción de las estructuras, se colocaran unas conexiones a armadura, fijas, que permitieran comprobar potenciales de forma fácil y económica, sin necesidad de realizar ninguna cata.

Otra de las mejoras que se proponen es la realización de medidas de potencial con diferentes condiciones climáticas, (lluvia, sol, suelos saturados, viento), y tomar como medida de potencial la media de las lecturas anteriores. Con esto se elimina parte de la influencia que ejerce el estado de humedad del electrolito sobre las medidas. [7]

6. Presupuesto

Cantidad.		Concepto	Precio	Total
10	ud	Medida de potenciales por el método de media pila en armaduras embebidas en hormigón en una superficie de hasta 25 m ² y con retícula de 50 *50 cm.	300 €	3000€
1000	Km	Vehículo desplazamiento tipo turismo	0.23€	230€
1	ud	Realización de informe final	500€	500€
Precio de Ejecución Material				3.730,00€
Precio de Ejecución por Contrata				4.438,70€
IVA 18%				798,97€
TOTAL				5.237,67€

El precio de ejecución por contrata (I.V.A incluido) asciende a la cantidad de cinco mil doscientos treinta y siete euros con sesenta y siete céntimos (5.237,67 €)

Tanto los medios de acceso (plataforma, andamios, cesta elevadora, etc.) como los medios de señalización necesarios para trabajar en presencia de tráfico no están incluidos.

7. Bibliografía

1. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
2. J.M Fernández Paris "La carbonatación de la pasta hidratada de cemento Portland. Interpretación físico-química". Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento nº 310 mayo 1973.
3. Tuutti, K. "Corrosion of steel in concrete", Tesis, CBI research, Estocolmo 1992.
4. ASTM (2000). "Standard test method for half -cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete Standard C 876-87". Annual book of ASTM Standards, vol.04.02. Philadelphia: Ed. American Society for Testing and Materials
5. Rodríguez Mariona, J. "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado" en Patología, Refuerzo Rehabilitación de Hormigón Armado, Curso monográfico Enero 93 INTEMAC
6. PING GU; BEAUDOIN, J.J."Obtaining Effective Half-Cell Potential Measurements in Reinforced Concrete Structures "(1998). National Research Council Canada. En <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n18.html>
7. François, R. Arliguie, G. Handan, Z. "Utilisation de l'interprétation en valeur relative des mesures de potentiel d'électrode des armatures du béton". Laboratoire Matériaux et durabilité des Constructions INSA-UPS Toulouse. En ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS. Nº 488-NOV 1990.série: essais et mesures 230
8. Andrade, C. "Corrosión de armaduras y su inspección en hormigones de cemento aluminoso". Informes de la Construcción nº 422 noviembre- diciembre 1992.
9. Morán, F."El hormigón armado" ed. Dossat, SA 5ª edición 1953.
- 10.Fernández Cánovas, M."Patología y terapéutica del hormigón armado". Ed. Dossat 1ª edición. 1977
- 11."Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos" RC-97

12. Jiménez Montoya, P. García Meseguer, A. Morán, F. "El hormigón armado" ed. Gustavo Gili SA 7ª edición ISBN 84-252-0758-4
13. Sánchez de Rojas Noguera, Mª José. "Extracción electroquímica de cloruros en el hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento" UPA.
14. Soria, F. "Conglomerados hidráulicos" Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento (CSIC) ISBN 84-7292-249-9.
15. Gomá. F "El cemento portland y otros aglomerantes" Editores Técnicos Asociados S.A. 1979 ISBN 84-7146-192-7
16. Fernández Paris, J.M "Estructura de la pasta de cemento hidratado" en Patología, Refuerzo Rehabilitación de Hormigón Armado, Curso monográfico Enero 93 INTEMAC
17. López Sánchez. "Durabilidad del hormigón" en Patología, Refuerzo Rehabilitación de Hormigón Armado, Curso monográfico Enero 93 INTEMAC

ANEJO A: Estado del conocimiento I. Hormigón armado.

A.1. Introducción.

El hormigón armado es el material de construcción más empleado en el mundo debido a sus excelentes propiedades mecánicas, a su bajo coste, a la posibilidad que ofrece a los arquitectos e ingenieros para crear elementos estructurales con formas que difícilmente serían posibles con otro tipo de material, debido al carácter plástico que posee en estado fresco y a la posibilidad de fabricar piezas de gran monolitismo sin necesidad de juntas ni uniones.

Por otra parte, el desarrollo de los métodos de cálculo, junto con la incorporación de potentes programas informáticos, han hecho posible la realización de estructuras resistentes cada vez más al límite, ahorrando materias primas y energía. Estructuras cada vez más esbeltas que representan verdaderos retos en el mundo de la ingeniería y arquitectura jamás imaginados. Esto obliga a estudiar y profundizar la búsqueda de nuevas posibilidades potenciales del material (hormigones de altas resistencias, de fraguado y endurecimiento rápido, etc.) y profundizar en el estudio de los factores que lo hacen vulnerable, con el fin de acotarlos.

El estado de pasividad química que confiere el hormigón a las armaduras embebidas en él, así como la barrera física que supone el propio recubrimiento de las mismas frente a la entrada de agentes externos nocivos, hizo pensar en los inicios de su utilización, que este material era casi eterno con unos niveles de mantenimiento muy bajos.

Nada más lejos de la realidad. Los problemas de corrosión de las armaduras del hormigón y las patologías causadas por este fenómeno son causa de grandes pérdidas económicas en todos los lugares del mundo y hace que cualquier inversión destinada al desarrollo y la investigación de hormigones que sean resistentes a este fenómeno, se da por bien empleado.

La corrosión se inicia cuando penetran en el hormigón agentes contaminantes capaces de romper la capa pasivante. El desencadenante de la corrosión puede ser la carbonatación del hormigón o el ingreso de cloruros procedentes de las sales de deshielo o del rocío marino que tienden a destruir la capa pasivante [8].

La corrosión es sin duda el principal problema de durabilidad del hormigón armado y uno de los problemas no resueltos por la tecnología del hormigón.

Son innumerables los textos científicos que se publican al respecto y muchos los esfuerzos que realiza la comunidad científica para poder eliminar o minimizar el fenómeno de la corrosión. Por otra parte, hay una labor normativa muy importante en cuanto a la calidad y durabilidad de las construcciones. En este sentido, reseñar la Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08, donde la durabilidad es otro más de los estados límites. El ingeniero proyectista ha de diseñar las estructuras y calcularlas no solamente frente a las acciones mecánicas sino también para que duren, mediante el procedimiento de los estados límites: "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". [1]

A los efectos de la Instrucción EHE 08, los Estados Límite se clasifican en:

- Estados Límite Últimos
- Estados Límite de Servicio.
- Estado Límite de Durabilidad [1]

A.2. Hormigón armado.

Es un material compuesto formado por una armadura de acero embebida en una matriz de hormigón en masa en forma tal, que las buenas cualidades de resistencia de cada uno de ellos compensan las malas cualidades del otro.

La matriz de hormigón está formada por:

- Una mezcla de áridos de diferentes granulometrías.

- Una pasta formada por cemento y agua que constituye el material aglomerante.
- Aditivos y adiciones que no siendo imprescindibles para la confección del hormigón, se añaden al mismo bien para modificar alguna de sus características (aditivos como acelerantes de fraguado, plastificantes, aireantes) o bien con el fin de abaratarlo (adiciones).

El hormigón armado se caracteriza por la perfecta colaboración de los dos materiales para soportar toda clase de esfuerzos, absorbiendo el hormigón principalmente las tensiones de compresión, y el acero las de tracción. Esta característica lo convierte en el material de construcción por excelencia.

La distribución de esfuerzos entre el hormigón y el acero, en relación a sus respectivos módulos de elasticidad, es perfecta debido a la gran adherencia entre los dos materiales, que permite la transmisión mutua de los esfuerzos por la acción de otro de deslizamiento, entre las dos superficies contiguas, estando basada en esta propiedad la posibilidad de su cálculo. El peligro del deslizamiento del hierro dentro del hormigón a causa de las dilataciones térmicas, tampoco es de temer, dada la igualdad de ambas. Por otra parte, la adherencia es tan sólida, que tampoco se altera con las vibraciones normales a que pueda estar sometida la pieza de hormigón armado.

En esta propiedad de la adherencia está fundado el poder enlazar las armaduras sin necesidad de soldaduras, siendo suficiente con solapar o superponer las barras en la longitud necesaria para que el hormigón, por adherencia, pueda transmitir los esfuerzos de una barra a otra. [9]

El peso específico del hormigón regularmente armado oscila alrededor de 2400 Kg por m³ y es este valor el que se adopta en los cálculos. Se trata de un material compuesto pesado con una relación peso/resistencia elevada.

Todas las propiedades atribuibles al hormigón en masa pueden aplicarse también al hormigón armado, si bien su fabricación y puesta en obra requiere de cuidados adicionales para obtener elementos duraderos. Hay que hacer hincapié en la obtención de hormigones compactos y que las armaduras presenten la cobertura de hormigón necesaria para protegerlas.

La patología del hormigón armado está condicionada por la patología de sus componentes, por lo que estos deben reunir una serie de características que impidan el desarrollo a corto o largo plazo de defectos más o menos graves en él.

A continuación se describen de forma aislada cada uno de los componentes que forman el material, hormigón armado, donde se repasa alguna de las exigencias y limitaciones que marcan las diferentes normas existentes referidas a su durabilidad.

A.2.1 Componentes del hormigón armado

- **Áridos**

Con el fin de evitar efectos patológicos en el hormigón producidos por el empleo de áridos no adecuados, la Instrucción EHE 08 en el artículo nº 28, especifica las características que deben cumplir los áridos empleados en la confección de los hormigones y establece las limitaciones de sustancias perjudiciales que podrán contener estos.

Los áridos empleados en la fabricación del hormigón no deben ser activos frente al cemento y deben ser lo suficientemente estables frente a la acción de los agentes exteriores con los que van a estar en contacto en la obra.

No deben emplearse áridos procedentes de rocas blandas, friables, porosas, etc, ni aquellos otros que contengan nódulos de pirita, yeso, compuestos ferrosos, etc.

Para la fabricación de hormigón podrán emplearse arenas y gravas procedentes de yacimientos naturales, así como rocas machacadas, escorias siderúrgicas u otros productos cuyo empleo se encuentra sancionado por la práctica o en su defecto, que se consideren adecuados después de haber sido ensayados en laboratorio. [10]

Los áridos deben estar exentos de sustancias perjudiciales, como limos, arcillas, materia orgánica, etc, que mermen su adherencia a la pasta de

cemento o que perjudiquen las reacciones de fraguado y endurecimiento del hormigón.

De una forma general, puede decirse, que la medida de la densidad de un árido es la medida de su calidad. Una densidad baja indica áridos porosos y poco resistentes.

Los áridos no deben reaccionar con el cemento dando lugar a productos expansivos que puedan crear tensiones internas en la masa del hormigón, que alteren o mermen las resistencias mecánicas o durabilidad de este.

Entre los áridos considerados nocivos, se encuentran algunas variables de cuarzo amorfo, tales como: opalos, cristobalitas, andesitas, tridimitas, etc, que al combinarse con los álcalis del cemento dan productos de mayor volumen que destruyen al hormigón. Estos áridos afortunadamente no abundan en España.

En España por el contrario abundan los yesos. En la fabricación del cemento, veremos que se añade una pequeña cantidad de yeso al clinker en el molino de cemento. Este yeso añadido reacciona antes de las veinticuatro horas con una parte del aluminato tricálcico dando ettringita, la otra parte del aluminato queda libre para reaccionar. Si posteriormente, una vez endurecido el hormigón, encuentra sulfatos, bien en los áridos, o bien en las aguas con las que va a estar en contacto el hormigón y reacciona dando más ettringita que es expansiva, puede producir una patología por sulfatos cuya manifestación en el hormigón son fisuras, grietas y hasta la desintegración del hormigón.

Las piritas y otros sulfuros en contacto con la atmósfera pueden oxidarse. Este tipo de árido presenta una doble patología; por una parte los sulfuros de hierro se oxidan con un incremento de volumen que introduce tensiones importantes en la masa del hormigón, y por otra parte los productos disueltos procedentes de la oxidación, contaminan

por sulfatos la masa del hormigón pudiendo combinar con los aluminatos y formar ettringita expansiva. [10]

- **Agua**

El agua de amasado juega un doble papel en el hormigón. Por un lado, participa en las reacciones de hidratación del cemento; por otro, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo necesario. Cada litro de agua de amasado añadido de más a un hormigón, equivale a una disminución de 2 kg de cemento. Para compensar las pérdidas de agua por evaporación y permitir que se desarrollen nuevos procesos de hidratación con aumento de resistencias, el hormigón debe curarse con abundancia de agua.

Tanto el agua de amasado como el agua de curado deben ser aptas para desempeñar eficazmente su función.

Desde el punto de vista patológico el empleo en el amasado del hormigón de aguas no potables y no sancionadas por la práctica puede crear problemas a corto y largo plazo en el hormigón. [10]

La existencia de cloruros en el agua de amasado puede dar lugar a corrosiones importantes de las armaduras del hormigón armado.

Si el empleo de aguas no adecuadas en el amasado de hormigones resulta perjudicial, mucho más peligroso y potencialmente contaminante es el agua que recibe el hormigón cuando está endureciendo o ya está duro (agua de curado o del medio), porque las reacciones que pueden originar ya no actúan sobre una masa en estado plástico. Se debe ser mucho más estricto en la aptitud de un agua para curado que en la de un agua para amasado.

Finalmente señalar que la norma EHE- 08 en su artículo nº 27 regula las condiciones que debe cumplir el agua utilizada en el amasado y curado del hormigón.

- **Acero**

Los productos de acero que pueden emplearse para la elaboración de armaduras pasivas pueden ser:

- Barras rectas o rollos de acero corrugado soldable.
- Alambres de acero corrugado o grafilado soldable.
- Alambres lisos de acero soldable

Sus características se recogen en la Instrucción EHE-08 en su capítulo 6 artículos 32 a 36. [1]

- **Cementos.**

En general se llaman conglomerados hidráulicos aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen sumergidos en este líquido y son prácticamente estables en contacto con él. Los conglomerantes hidráulicos más importantes son los cementos, existiendo una gran variedad de tipos.

Los tipos, clases, categorías y características están recogidos en España en el "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos" RC-97. (PPTGRC-RC97). [11]

Además, el artículo 26º de la Instrucción EHE-08 establece el tipo y categoría de cemento a emplear en la confección de los hormigones regulados por dicha instrucción.

De forma general, los distintos tipos de cemento, excepto el cemento de aluminato de calcio, consisten en modificaciones del cemento portland. Cada tipo de cemento tiene unas determinadas características. Siempre que estudiemos o analicemos una patología que presente un determinado hormigón, será necesario conocer el tipo de cemento que se empleó en su fabricación. Es necesario realizar un "As-Built" (documento que recoge las características finales de la obra realizada), al final de las obras, que recoja tanto las dosificaciones de los hormigones empleados y el tipo de cemento utilizado, como los ensayos

de resistencia realizados, con el fin de conocer en el futuro las características del material empleado. (El "As-Built" es el documento más importante desde el punto de vista de la conservación).

De todos los cementos que se recogen en el PPTGRC-RC97 [11], el más empleado con fines estructurales es el cemento portland en sus diferentes categorías. Por este motivo estudiaremos con más detalle este tipo de cemento, analizando los factores que más puedan influir en su patología y que puedan causar una acción negativa sobre los hormigones en los que interviene.

Ni que decir tiene que los defectos en la dosificación, cocción y molienda, las adulteraciones de cualquier tipo de cemento durante su fabricación o posteriormente a ella, las alteraciones producidas por una mala conservación o un mal empleo, pueden repercutir desfavorablemente en sus resistencias, en su estabilidad o en la de los hormigones con él fabricados y en la durabilidad de los mismos.

A.3. Cemento Portland

El cemento portland artificial puede definirse como el producto obtenido por mezcla íntima de calizas y arcillas (u otros materiales, en cuya composición entran SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 como componentes básicos), cocción de la mezcla hasta la sinterización (parte del material se encuentra en estado líquido) y molienda del producto resultante, con una pequeña adición de yeso, a un grado de finura elevado (Figura A1).

Las dos materias primas principales son los materiales calizos (ricos en carbonato cálcico) y los materiales arcillosos (cuyo componente principal son los silicatos de aluminio hidratados) las mezclas naturales de los anteriores se llaman margas y su composición oscila entre la de los componentes principales.

El clinker del cemento está formado por una mezcla de silicatos, aluminato y ferrito aluminato cálcico, esto hace que en las materias

primas estén los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en proporciones correctas.

Los materiales calizos suelen tener pocas impurezas nocivas (salvo el carbonato magnésico) y muy diseminadas en su masa; sin embargo, las arcillas pueden contener magnesia, álcalis y sulfatos

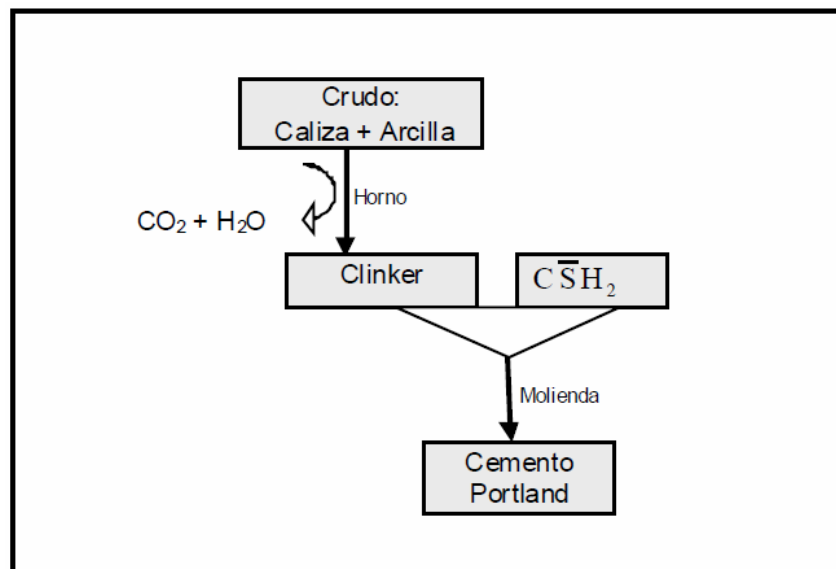


Figura A1. Fabricación del cemento Portland [13]

A.3.1 Composición química del cemento portland.

Las características y propiedades del cemento portland están íntimamente ligadas a su composición química y a su constitución potencial. La primera se determina por análisis y viene expresada en forma de óxidos. La composición química media de cemento portland (Figura A2) puede ser la siguiente: [12]

Componentes	Nomenclatura	% sobre la mezcla	abreviatura
Cal combinada	CaO	62.5	C
Sílice	SiO ₂	21.0	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.5	A

Hierro	Fe_2O_3	2.5	F
Azufre	SO_3	2.0	\bar{S}
Cal libre	CaO	0.0	C
Magnesia	MgO	2.0	M
Pérdida al fuego	P.F	2.0	P.F
Residuo insoluble	R.I	1.0	R.I
Álcalis	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5	N+K

Figura A2. Composición química media del cemento portland [12]

La columna cuarta de la figura A2 recoge las abreviaturas: C; S; A; F y M para denominar en forma abreviada respectivamente al CaO ; SiO_2 , Al_2O_3 y MgO . Esta nomenclatura fue propuesta por Rankin y Wright en 1915 y es la que se usa en la industria cementera (**11**). Con esta nomenclatura los componentes principales se denominan: **SC₃** : Silicato tricálcico o Alita; **SC₂**: Silicato bicálcico o Belita; **AC₃**: Aluminato tricálcico o Celita y **FAC₄** : Ferrito-aluminato tetracálcico o Celita.

Los cuatro primeros componentes, CaO ; SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 son los principales del cemento, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Los restantes componentes son los indeseables del cemento. A continuación se comentan brevemente:

- **Óxido de cal libre CaO .** La cal libre y el hidróxido cálcico coexisten normalmente en la pasta de cemento. Una parte de la primera se hidrata y pasa a la segunda durante el amasado, pero si el contenido en CaO libre del cemento es superior a 1,5% o 2%, queda otra parte capaz de hidratarse en el transcurso del endurecimiento, es decir, a edades medias o largas, lo que puede dar lugar a fenómenos expansivos. Por ello no deben admitirse contenidos superiores al 2% de cal libre en un cemento

- **Óxido magnésico MgO.** La magnesia MgO puede presentarse en el clinker en estado vítreo o en estado cristalino (periclasa), siendo esta última forma realmente peligrosa, debido a su lenta hidratación para pasar a hidróxido magnésico $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en un proceso de carácter expansivo. Por ello se limita el contenido de magnesia en un 5%.
- **Trióxido de azufre SO_3 .** El azufre proviene de la adición del yeso que se hace al clinker durante la molienda para regular el fraguado, pudiendo también provenir del combustible empleado en el horno. Un exceso de este producto puede conducir al fenómeno de falso fraguado, por lo que conviene ser estricto en la comprobación de no rebasar el 3%.
- **Pérdida al fuego.** Cuando su valor es apreciable, la pérdida al fuego proviene de la presencia de adiciones de naturaleza caliza o similar, lo cual no suele ser conveniente. Si el cemento ha experimentado un prolongado almacenamiento, la pérdida al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO_2 presentes en el conglomerante, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.
- **Residuo insoluble R.I:** Proviene de la presencia de adiciones de naturaleza silíceas. No debe superar el 3%.
- **Álcalis:** Proviene en general de las materias primas y se volatilizan en buena parte, encontrándose luego en el polvo de los humos de las fábricas de cemento. No suelen superar el 0,8%.

A.3.2 Composición potencial.

Los cuatro componentes, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , anteriormente citados no se encuentran libremente en el cemento, sino combinados formando silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los constituyentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales. Estos minerales o componentes activos del clinker están formados por la composición de dos o más óxidos principales y forman cristales mixtos en los que entran compuestos de otras fases en cantidades reducidas. Los componentes principales se encuentran en el clinker en estado cristalino aunque no en su totalidad pues de un 2 % a un 12% de ellos se encuentran en fase amorfa.

De los cuatro componentes principales del clinker, los silicatos suman del 60% al 80 % de las resistencias mecánicas y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento (Figura A3)

Nombre	Composición	P.M. (g/mol)	Calor de hidratación (cal/g)	Fórmula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	228	120	C_3S	Alita
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	172	60	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	270	207	C_3A	Felita
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	486	100	C_4AF	Celita

Figura A3. Principales componentes del cemento portland [13]

A continuación se comentan brevemente los cuatro componentes citados [12]

- **Silicato tricálcico (C_3S) o alita.** Es el compuesto activo por excelencia del clinker, porque desarrolla una resistencia inicial elevada, siendo su calor de hidratación también muy elevado. Su fraguado es lento y su endurecimiento bastante rápido. Por ello aparece en gran proporción en los cementos de endurecimiento rápido y en los de altas resistencias iniciales.
- **Silicato bicálcico (C_2S) o belita.** Es el componente que comunica al cemento su resistencia a largo plazo, al ser lento su fraguado y muy lento su endurecimiento. Es metaestable, durante el enfriamiento parte del silicato se transforma en la forma metaestable $\beta\text{-C}_2\text{S}$ y si el enfriamiento es lento esta variedad se transforma en la estable $\gamma\text{-C}_2\text{S}$. Su calor de hidratación es el más bajo de los cuatro y su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico. Por ello, los cementos con alto contenido en silicato bicálcico son más resistentes a los sulfatos que los de bajo contenido.
- **Aluminato tricálcico (C_3A) o celita.** Suministra al cemento un calor de hidratación muy grande, elevadísima velocidad de fraguado y gran retracción, por lo que es el compuesto que gobierna las resistencias a corto plazo. Su estabilidad química es buena frente a

ciertas aguas agresivas (agua de mar) y muy débil frente a sulfatos. Precisamente con objeto de frenar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento, se añade al clinker un sulfato (piedra de yeso). Señalar que este componente, el C_3A , tiene la capacidad de fijar al cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión de las armaduras.

- **Ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) o celita.** No participa apenas de las resistencias mecánicas y su presencia se debe a la necesidad de utilizar fundentes que contienen hierro en la fabricación de clinker. Tiene un pequeño calor de hidratación y gran velocidad de fraguado. Su resistencia a las aguas selenitosas y agresivos en general es la más alta de todos los constituyentes. Tiene un color oscuro que le hace prohibitivo para los cementos blancos por lo que en estos casos se usan otros fundentes.
- **Cal libre (CaO) y óxido de magnesio (MgO).** Componente secundario del clinker de cemento. Su hidratación es expansiva pudiendo dar lugar a fisuras superficiales en el hormigón e incluso al debilitamiento y destrucción del mismo.
- **Álcalis (K_2O y Na_2O).** Pueden presentar varios problemas. Destacamos la reacción expansiva que puede tener con determinados áridos silíceos (reacción árido- álcali).

Resumiendo, los silicatos son los principales responsables de las resistencias mecánicas del cemento. Ambos silicatos a largo plazo adquieren al hidratarse las mismas resistencias, pero sus curvas discurren por diferentes caminos y así las resistencias iniciales cabe atribuírselas al silicato tricálcico. (Figura A4) [10]. El aluminato tricálcico y el ferritoaluminato tetracálcico no juegan un papel importante en las resistencias mecánicas. El aluminato acelera el endurecimiento del cemento en las primeras horas, aunque su presencia es nefasta para la durabilidad del hormigón. El ferritoaluminato tetracálcico apenas si contribuye a las resistencias, sin embargo, ambos constituyentes aluminato y ferrito aluminato son mineralizadores y hacen posible la cocción de los cementos a temperaturas asequibles industrialmente.

El módulo de elasticidad del cemento está relacionado con sus resistencias mecánicas siendo, por tanto, función de la composición mineralógica de éste, al igual que lo son las resistencias.

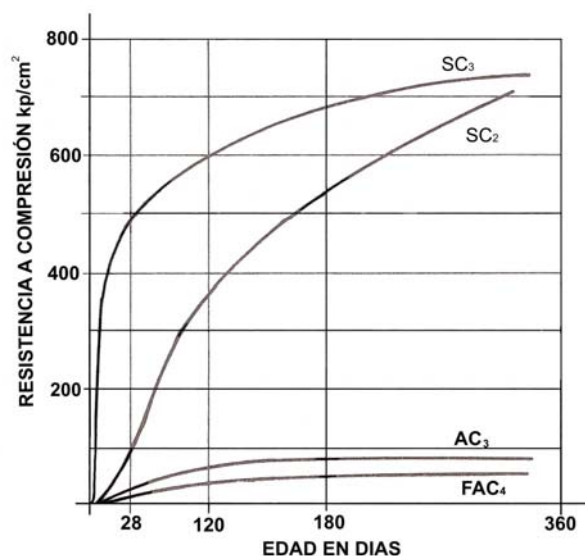


Figura A4. Influencia de los componentes del cemento en su resistencia [10]

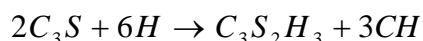
A.3.3 Hidratación del cemento portland

Al mezclar el cemento con agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido. A este proceso se le conoce como fraguado. [10]

La hidratación del cemento es un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado por lo que es importante mantener un ambiente de elevada humedad durante varios días. A este periodo de tiempo se le denomina "curado" y es en este periodo en el que aumenta progresivamente la resistencia mecánica al ir precipitando sus componentes hidratados.

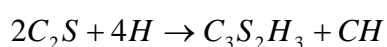
La hidratación separada de cada componente del cemento ocurre de la siguiente forma [13]:

Silicato tricálcico. Reacciona con el agua produciéndose silicatos cálcicos hidratados $C_3S_2H_3$ (gel de tobermorita) y portlandita CH:

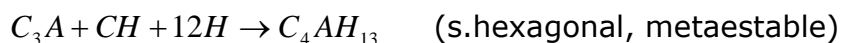


Estos silicatos cálcicos tienen carácter coloidal y se les conoce también como "gel CSH". Tiene la capacidad de absorber cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión de las armaduras del hormigón.

Silicato bicálcico: Reaccionan más lentamente según:



Aluminato tricálcico: Forma aluminatos cálcicos cristalinos, algunos son estables (los que cristalizan en el sistema cúbico) y otros metaestables (hexagonales):

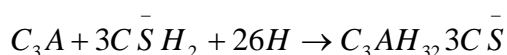


Una relación agua-cemento, a/c, alta favorece la formación de aluminatos hexagonales y un valor bajo la formación de cúbicos. Los aluminatos hexagonales pueden experimentar a largo plazo una conversión en la que se transforman en cúbicos y liberan agua:



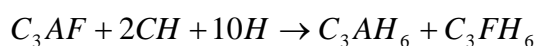
Los aluminatos cúbicos son menos voluminosos que los hexagonales debido a la pérdida de agua. Esto hace que esta conversión venga acompañada de una reducción del volumen ocupado por los sólidos en el hormigón y por tanto una pérdida de compacidad, aumento de porosidad y disminución de las resistencias mecánicas. En el hormigón de cemento aluminoso se puede producir también una conversión similar que es la causa principal del proceso de deterioro conocido como aluminosis.

La reacción del C_3A con el agua es muy rápida, dando lugar a un endurecimiento rápido de la pasta conocido como "fraguado relámpago". Para evitarlo y hacer la mezcla trabajable se añade al clinker un regulador de fraguado que normalmente es yeso dihidrato ($\bar{C}\bar{S}H_2$). El yeso y el aluminato reaccionan para formar sulfoaluminato cálcico hidratado insoluble, también conocido como "ettringita" o "sal de candlot", que bloquea superficialmente las partículas de C_3A impidiendo su hidratación a una velocidad excesiva.

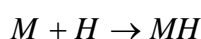
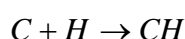


El C_3A contribuye poco a la resistencia mecánica del hormigón y es, además, indeseable por ser atacado por los sulfatos de forma expansiva. Sin embargo, es necesario ya que los óxidos de aluminio actúan como fundentes en la cocción del crudo.

Ferrito aluminato tetracálcico: produce aluminatos cálcicos y ferritos cálcicos:



Óxidos de calcio y magnesio libre: la formulación de sus productos hidratados da lugar a un aumento de volumen:



A.3.4 Estructura porosa composición de la disolución interna de los poros del hormigón.

Para la hidratación total de los componentes del cemento es necesario una relación mínima agua-cemento (a/c) de 0.37 [15]. Con esta relación agua cemento no seríamos capaces de obtener una mezcla de hormigón trabajable (muy seco), lo que obliga a elevar dicha relación a valores entre los 0.45 y los 0.65.

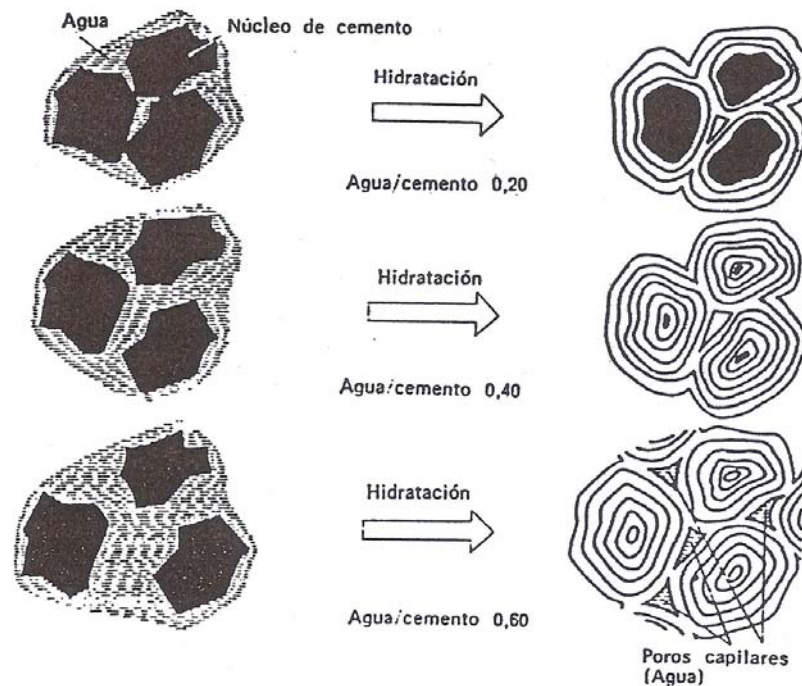


Figura A5. Hidratación de la pasta de cemento y formación de poros capilares. Según representación de T.C, Powers y R.A, Helmuth [16]

El agua en exceso (aquella no empleada en la hidratación de los componentes del cemento) queda atrapada en el interior de la masa y forma una red de poros y capilares. Las burbujas de aire ocluido también participan en la formación de esta red de poros, cuyos tamaños varían desde pocos nanómetros (microporos) a micrómetros (capilares) o incluso milímetros (grandes poros o poros de aire). Estos poros pueden estar interconectados entre sí (porosidad abierta) o no (poros cerrados). (Figura A6).

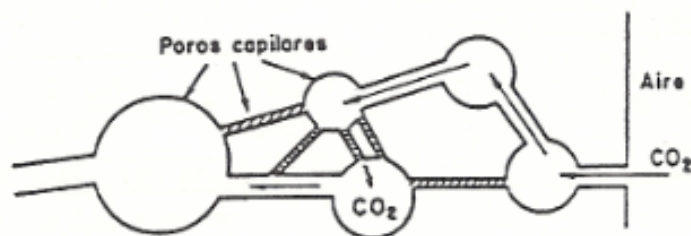


Figura A6. esquema de poros intercomunicados y cerrados [17].

Durante la hidratación del cemento se forman tanto nuevas fases sólidas como especies solubles, dando lugar a una compleja disolución acuosa encerrada en la red de poros. Es lo que muchos autores denominan como la "fase acuosa". El conocimiento de la composición de esta disolución es fundamental para la comprensión de los procesos químicos que se dan en el hormigón; la composición de esta disolución, aunque su determinación experimental es difícil, está formada principalmente por iones Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{-2} , y OH^- .

A.4. Durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

El hormigón fue considerado durante mucho tiempo como un material de construcción muy durable. Esta opinión, se ha basado en el buen comportamiento de numerosas estructuras antiguas (s XIX), e incluso podríamos remontarnos a algunas estructuras marítimas ejecutadas 25 años antes de J.C con los primitivos cementos romanos.

En la actualidad nadie duda de los problemas de vida útil que presenta el hormigón, intentando solventarlos tanto en el diseño como en la ejecución.

La influencia que la estructura porosa del hormigón tiene sobre la durabilidad del mismo es principal.

La pasta de cemento endurecida es un conglomerado formado por varias fases, con una gran proporción de conglomerante sin hidratar, ocluidos en un entramado de gel de cemento con multitud de poros capilares. Cuando se produce el fraguado, el agua sobrante que contienen el hormigón puede quedar en el interior del mismo o bien evaporarse, dejando una red de canalículos variados en tamaño. Esta red de poros supone un camino por el cual los agentes externos pueden llegar a dañar tanto al propio hormigón como a la armadura.

La porosidad de un hormigón es pues una variable de suma importancia en los procesos de degradación del hormigón. La porosidad varía de un hormigón a otro y depende de las variables de fabricación siguientes:

- Compactación del hormigón

- Relación agua-cemento a/c.
- Granulometría de los áridos.
- Presencia de finos.
- Aireación artificial de la mezcla mediante aditivos

El contenido de huecos y la permeabilidad al agua juegan un papel importante al estar íntimamente relacionados con la microestructura de la pasta endurecida, dando lugar al medio necesario para favorecer los procesos de difusión de gases y agentes agresivos.

Todos los procesos físicos y químicos relacionados con la durabilidad del hormigón están vinculados a dos factores:

- Los mecanismos de transporte en los poros y fisuras
- La presencia de agua

Condicionando ambos fenómenos tendremos el tipo de poros y la distribución de tamaño de poros o estructura porosa.

La porosidad permeable se puede definir como el reticulado de poros interconectados entre sí que genera un transporte de líquidos o gases y/o el intercambio de sustancia disueltas.

La distribución de tamaño de poros influye particularmente en el tipo y magnitud del mecanismo de transporte, así como en la permeabilidad al agua. El tamaño de poros en la pasta de cemento se mueve en un rango de varios órdenes de magnitud.

De acuerdo con el origen y características (figura A7), los poros se describen como:

- Poros de compactación (no están unidos entre sí, no forman red).
- Poros de aire ocluido (no están unidos entre sí, no forman red).
- Poros capilares.
- Poros de gel.

En términos generales, esta clasificación se suele unificar por tamaños, reduciéndose a:

- Microporos.
- Poros capilares.
- Macroporos.

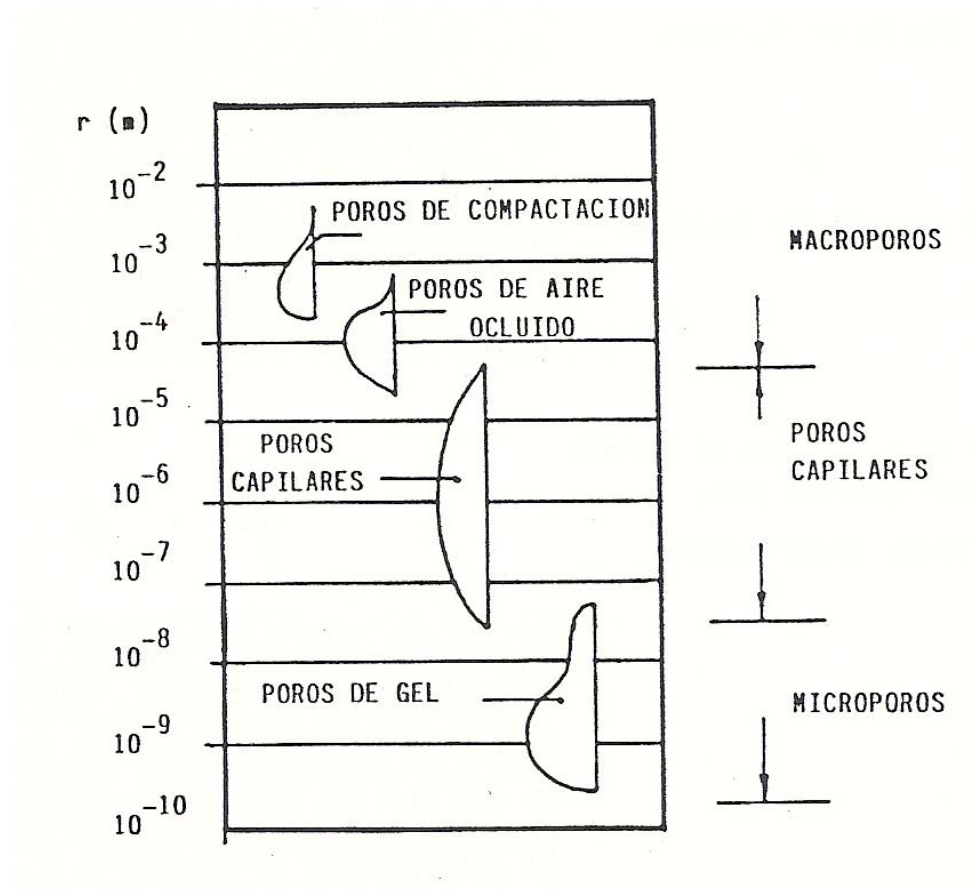


Figura A7 Clasificación de poros en función de su origen y características de los mismos. [17]

Desde el punto de vista de la durabilidad, los poros capilares y los macroporos son particularmente relevantes, al aumentar la proporción de poros capilares disminuye la resistencia del hormigón a agresiones físicas o químicas.

A.5. Procesos de degradación del hormigón.

Una clasificación de estos procesos de degradación clasificados en función del elemento que modifican (matriz o armado), es la presentada en el boletín nº 182 del C.E.B (Comité Euro-Internacional del hormigón) (Figura A8) [17], dividiendo los procesos según el tipo de ataque y estructurando separadamente la durabilidad del hormigón endurecido y de las armaduras:

Durabilidad	Procesos	Tipo de ataque
Hormigón endurecido	Físicos	Fisuración por deformación.
		Fisuración por fenómenos físicos.
		Heladas.
		Erosión.
	Químicos	Ácidos
		Sulfatos
		Reactividad alcalina
	Biológicos	Formaciones vegetales y bacteriológicas.
Armaduras	Químicos	Carbonatación.
		Difusión de cloruros
	Físico- Químicos	Corrosión bajo tensión.
		Fragilización por hidrógeno

Figura A8: Procesos de degradación del hormigón armado según C.E.B [17]

A.5.1 Agresión física al hormigón.

A.5.1.1 Fisuración. Cambios de temperatura

Durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón se producen cambios de volumen que generan tensiones internas en él. Si el elemento hormigonado está coaccionado y no permite estos movimientos, romperá, generándose grietas y fisuras que pueden mermar desde un principio la

durabilidad del hormigón. Es por tanto necesario, establecer juntas que permitan dichos movimientos. Las diferencias de temperatura entre invierno – verano general movimientos en las estructuras que son adsorbidos en las juntas.

A.5.1.2 Fisuración por deformación

Los elementos de hormigón estructural se deforman debido a las cargas que soportan. Estas deformaciones provocan la generación de fisuras de tipo mecánico que la Instrucción EHE- 08 limita a anchos de 0.2 mm. A pesar de la limitación en anchura, estas fisuras han de ser selladas pues de lo contrario puede favorecer la entrada de agentes nocivos para el hormigón o las armaduras y mermar su durabilidad.

A.5.1.3 Hielo deshielo

El fenómeno se produce en lugares de clima frío, donde las heladas son abundantes. Este ataque provoca el desmoronamiento superficial del hormigón disminuyendo de esta forma los recubrimientos de las armaduras.

Se pueden evitar con el uso de inclusores de aire que, con las burbujas aisladas que introducen en el hormigón aíslan la red capilar haciendo así un hormigón más impermeable

A.5.1.4 Erosión.

La erosión y abrasión sufrida por cada hormigón dependerá del agente abrasivo al que vaya a estar expuesto.

Una disminución de este efecto se puede conseguir con el empleo de áridos adecuados e incluso con recubrimientos protectores.

A.5.1.5 Recristalización de sales

Este fenómeno, tiene consecuencias similares a las de hielo- deshielo, al producirse un aumento de volumen de los cristales formados se general tensiones en el interior de los poros del hormigón que pueden generar

fisuras y grietas. En la superficie del hormigón aparecen eflorescencias que lo afean.

A.5.2 Agresión química al hormigón

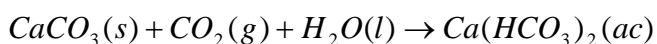
La degradación de una estructura de hormigón depende en muchos casos de la proporción en que el hormigón se descompone como resultado de una reacción química. Para que se produzcan estas reacciones, las sustancias agresivas deben estar siendo transportadas del medio al sustrato. Si el agente agresivo está presente en el hormigón, debe igualmente tener una movilidad que le permita ponerse en contacto con el soporte de reacción. Si el transporte en algunas de las dos facetas citadas está impedido o es muy reducido, pasarán muchos años para que se manifieste nocivo.

A.5.2.1 Ataque por ácidos

La acción de los ácidos sobre el hormigón endurecido se describe como la conversión de los componentes cálcicos (portlandita, silicatos cálcicos hidratados, y aluminato cálcico hidratado), de naturaleza alcalina, en sales correspondientes del ácido empleado en el ataque.

Cabe señalar la acción de los gases de carácter ácido que están presentes en ambientes industriales como el CO_2 y diferentes compuestos de azufre y nitrógeno. Con el CO_2 se pueden dar fenómenos de disolución y precipitación dada la solubilidad de los bicarbonatos.

$\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$ **(Reacción de carbonatación del hormigón)**



En condiciones de exposición naturales, la única reacción que se produce siempre, y de forma natural, por el simple hecho de poner en contacto el hormigón con el ambiente, es la primera, conocida como reacción de carbonatación.

En función del tipo de ácido, vamos a encontrar la formación de distintas sales, con las propiedades que confieren cada una de ellas. Cuanto más solubles sean los compuestos formados, mayor será el grado de degradación del hormigón, al facilitarse las vías de ataque posteriormente a la disolución.

Igualmente, el ataque y posterior degradación de una disolución con aporte continuo (fluye y se renueva) es mucho más peligrosa que una disolución confinada, donde no hay renovación del nivel de concentración y el grado de agresividad disminuye con el tiempo.

Este tipo de ataque produce la descohesión de la pasta hidratada en toda la superficie de contacto quedando, anulada la capacidad de unión entre las partículas, y se destruye por completo el reticulado de poros. (Figura A9).

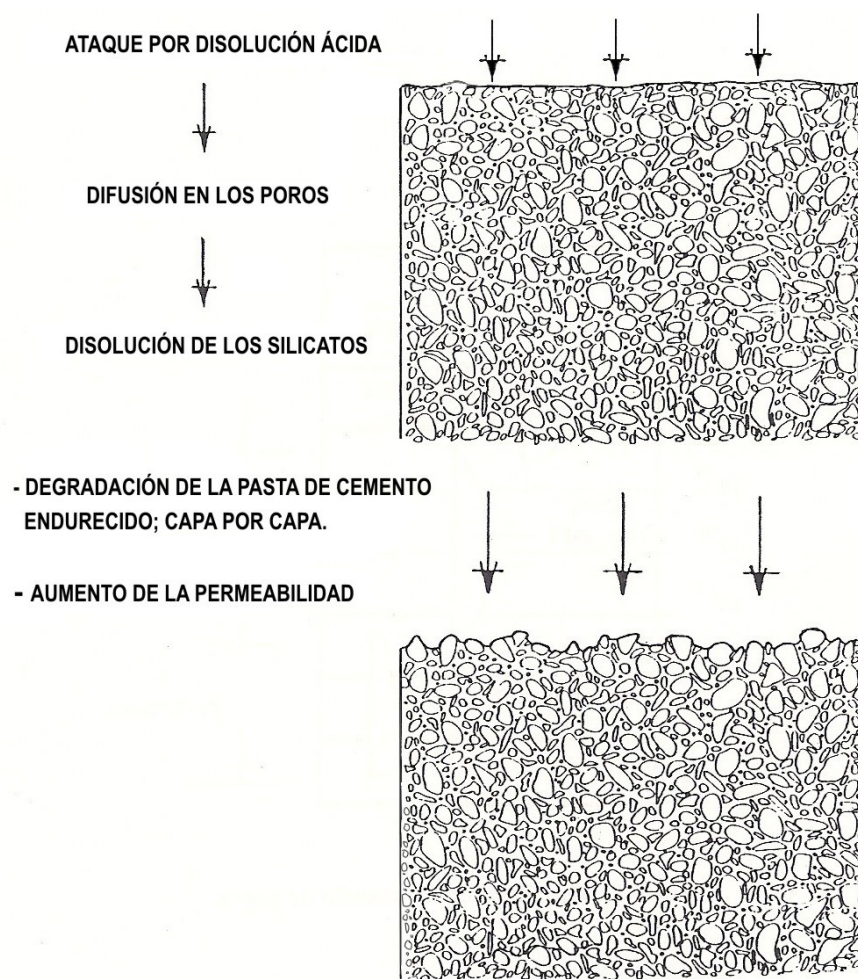


Figura A9. Croquis que representa un ataque por ácidos.(15)

A.5.2.2 Ataque por sulfatos.

El ataque por sulfatos se centra casi exclusivamente en los aluminatos cálcicos presentes en la pasta de cemento hidratado.

Esta reacción lleva consigo un incremento importante de volumen, debido a que el compuesto que se produce forma una capa de solvatación con un gran número de moléculas de agua. En términos químicos, pueden describir varias formas de ataques, que no son excluyentes entre sí.

Uno de los procesos postulados indica la formación de yeso, al reaccionar el anión sulfato disuelto en agua con la portlandita del cemento, yeso que se deposita en los poros del hormigón en los que cristaliza con absorción de dos moléculas de agua (Figura A10).

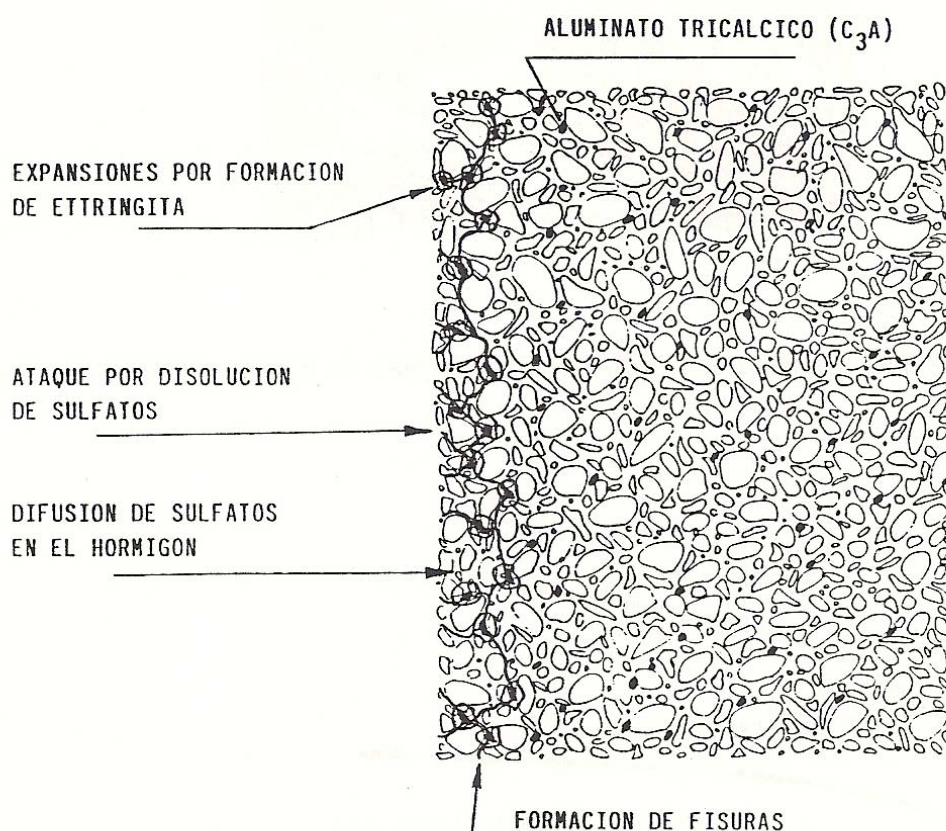


Figura A10. Ataque por sulfatos [17]

Este proceso de reacción química y cristalización , que va acompañado por un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del hormigón, especialmente en los de las capas superficiales, y termina por lograr su desmoronamiento. La cristalización del yeso, viene acompañada por un aumento de volumen del 17,7 %.

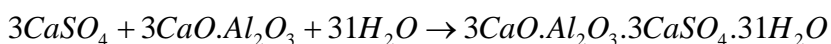


Relación en volumen 1:1.18

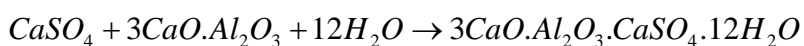
Este proceso ocupa un lugar irrelevante, ya que la degradación producida por los sulfatos está causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tricálcico del cemento.

El AC₃ reacciona con el yeso formado por la reacción del ión sulfato agresivo y el Ca(OH)₂ o con tal que fuera aportado por la disolución agresiva, formándose un sulfoaluminato cálcico hidratado de gran complejidad y poco soluble. Este compuesto cristaliza absorbiendo entre 30 y 32 moléculas de agua y creando fuertes presiones internas, a causa de su aumento de volumen. Esta sal compleja es la llamada "sal de Michaelis- Candlot- Deval, o comúnmente "sal de Candlot", que existen en la naturaleza en forma de cristales aciculares bajo la denominación de ettringita.

El proceso químico sería:



No obstante la ettringita, con un 227% en volumen respecto a los productos de partida, no siempre se forma en toda su extensión. Se ha postulado que la adición de distintos aniones y las variaciones del pH dan lugar a diversidad de componentes primarios, como el monosulfoaluminato tricálcico, con 12 moléculas de agua



Las reacciones indicadas causan expansiones que producen tensiones en el material capaces de realizar microfisuras al hormigón, facilitando el acceso del agente agresivo hasta conseguir una degradación total.

Hay tres factores que van a influir considerablemente a que se produzca o no el fenómeno expansivo y de degradación:

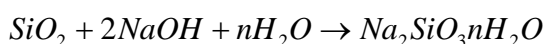
- Condiciones de exposición.
- Accesibilidad.
- Susceptibilidad del hormigón.

A.5.2.3 Reactividad alcalina.

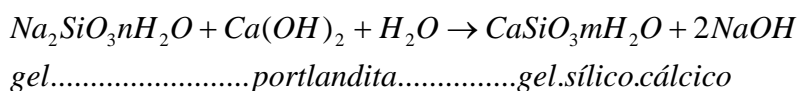
El hormigón, como un material muy alcalino, no es susceptible de reacción con otras sustancias básicas. No obstante, las bases fuertes pueden producir una reacción de intercambio con los componentes de la pasta cementante, formando un gel que puede cristalizar con ciclos de humedad y secado del hormigón, generando expansiones.

Otra forma de ataque es debida a que los álcalis del cemento disueltos en los poros, pueden reaccionar con la sílice de los áridos reactivos, causando un hinchamiento que puede conducir al deterioro del hormigón. Se considera árido reactivo aquel que contiene sílice amorfa o parcialmente cristalizada. El gel álcali- sílice formado adsorbe agua, dando lugar a un hinchamiento que causa tensiones internas.

De una forma simplificada las reacciones que tiene lugar serían:



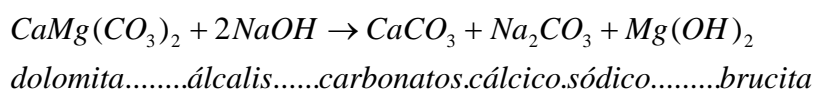
El producto formado puede reaccionar, en hormigón saturado, con la cal disuelta en los poros, formando una barrera o membrana protectora



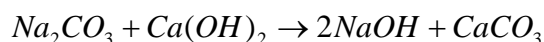
Menos conocida que la anterior, se ha detectado otra reacción árido álcali, denominada álcali- carbonato.

En este caso, los agentes reactivos no son minerales silícicos, sino carbonáticos, como la dolomita, o calizas con contenido de magnesio, que reaccionan con los álcalis del cemento.

Se produce un proceso de desdolomitación, que desemboca en la formación de $Mg(OH)_2$, compuesto potencialmente reactivo, conocido en la naturaleza como "brucita".



En presencia de cal libre o portlandita procedente de la hidratación del cemento se forma el álcali nuevamente, permitiendo que la reacción pueda continuar:



A.5.2.4 Aguas blandas y reacciones de intercambio.

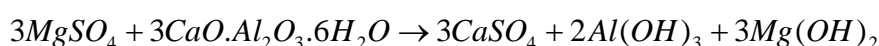
La agresividad de las aguas blandas se debe a que su bajo contenido de iones en disolución desplaza el equilibrio en los poros del hormigón, incrementando la solubilidad de los componentes.

En general, la agresividad de las aguas blandas disminuye al aumentar la dureza (la dureza de un agua aumenta con la concentración de calcio y magnesio, Ca^{2+} y Mg^{2+}), si bien depende de factores adicionales: altos contenidos de álcalis disueltos en los poros aumentan la solubilidad del $Ca(OH)_2$, igual que la presencia de pequeñas cantidades de CO_2 , incrementando la agresividad. Todo ello conduce a un "deslavado" del hormigón, con un aumento de la porosidad, facilitando el acceso del agua agresiva que continuará horadando hasta la degradación total.

Respecto a las reacciones de intercambio, las más representativas se deben a la acción de los iones magnesio y/o amonio.

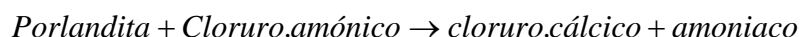
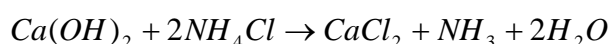
El mecanismo de reacción del Mg^{2+} , se basa en una sustitución catiónica sobre el hidróxido cálcico o las restantes sales cálcicas. Suponiendo que hubiera una agresión suficientemente intensa y continuada, todo el calcio del conglomerante podría ser sustituido progresivamente por el magnesio.

Suponiendo que el ataque se produjera por una disolución de sulfato magnésico, la reacción que tendría lugar sería:



Por tanto, el ión magnesio es especialmente peligroso en presencia del ión sulfato, pues la cristalización del yeso formado por la corrosión magnésica hace que la impermeabilización del hormigón sea mínima, produciéndose a continuación posibles formaciones de ettringita.

Respecto a las sales amónicas, cuando toman parte en la reacción, se forma amoniaco libre, que desaparece. Por lo tanto, a partir del hidróxido cálcico se forman sales cálcicas de alta solubilidad, que son arrastradas por el agua, aumentando la porosidad; por ejemplo:



Los poros permanecen vacíos, y la estructura va aumentando su porosidad permeable, por lo que la acción corrosiva es más peligrosa que en el caso del magnesio.

En resumen, las sales amónicas actúan como combinaciones que intercambian cationes, transformando compuestos poco solubles en fácilmente solubles, aumentando la porosidad y favoreciendo que la agresión progrese.

A.5.3 Agresiones por agentes biológicos

Se genera a partir de bacterias, proteínas, etc. Compuestos de azufre o compuestos de ácido que atacan al hormigón.

Puesto que la porosidad tiene un papel determinante a la hora de ser atacada una estructura por un agente agresivo, es muy importante que durante la ejecución de la estructura haya un control exhaustivo de los factores, que influyan en la porosidad del hormigón y en las fisuras que en el futuro puedan aparecer.

A.5.4 Agresión química a las armaduras.

El ataque químico a las armaduras del hormigón se denomina generalmente corrosión. De los procesos nocivos descritos anteriormente, es la corrosión de las armaduras el problema más importante que presenta el hormigón armado.

Todos los procesos descritos anteriormente y que afectan a la pasta de cemento (matriz) tienen como consecuencia la degradación final de la armadura y su corrosión.

Es claro que, al producirse el deterioro de las capas superficial del recubrimiento de hormigón, éste no puede desarrollar su función protectora respecto de las armaduras, con lo que aumenta notablemente la probabilidad de corrosión de estas.

Excluyendo los procesos relacionados directamente con la oxidación de las armaduras, hay dos factores que inciden en la alteración de la pasta de cemento hidratado, pero presentan mucha mayor relevancia respecto a los procesos de corrosión:

- La carbonatación
- La difusión de cloruros

ANEJO B: Estado del conocimiento II. Corrosión de armaduras.

B.1. Introducción

El ataque químico a las armaduras del hormigón se denomina generalmente corrosión. De los procesos nocivos descritos anteriormente, es la corrosión de las armaduras el problema más importante que presenta el hormigón armado. La corrosión de las armaduras está asociada con la pérdida de sección de las armaduras y con la disminución de adherencia entre hormigón y acero, lo que origina pérdidas importantes en la capacidad portante de las estructuras.

También, se produce una cierta fragilización de los cables de las armaduras activas como consecuencia de la corrosión.

La reparación o restauración de estructuras que presentan una patología por corrosión importante son caras y a veces, dependiendo del estado de avance de la patología, se hace necesario el refuerzo de la estructura acompañado de la demolición de los elementos afectados.

Las armaduras dentro de la masa del hormigón se encuentran protegidas por una capa de óxido que las protege de la corrosión por tiempo indefinido, siempre y cuando la pasta de cemento que lo envuelve mantenga su carácter básico (pH 12-14).

El proceso de corrosión de las armaduras se inicia cuando penetran en el interior de la masa del hormigón agentes nocivos capaces de romper dicha capa pasivante.

Las causas o factores desencadenantes que dan lugar a la despasivación del acero, es decir la rotura de la capa pasivante que los protege son dos:

- La carbonatación.
- La entrada de cloruros en el hormigón

Además de estos factores desencadenantes o causas, existen otros factores que condicionan la velocidad de corrosión de las armaduras. Los principales factores condicionantes, encargados de acelerar la velocidad de corrosión son la presencia de oxígeno y la humedad. (Figura B1) [13].

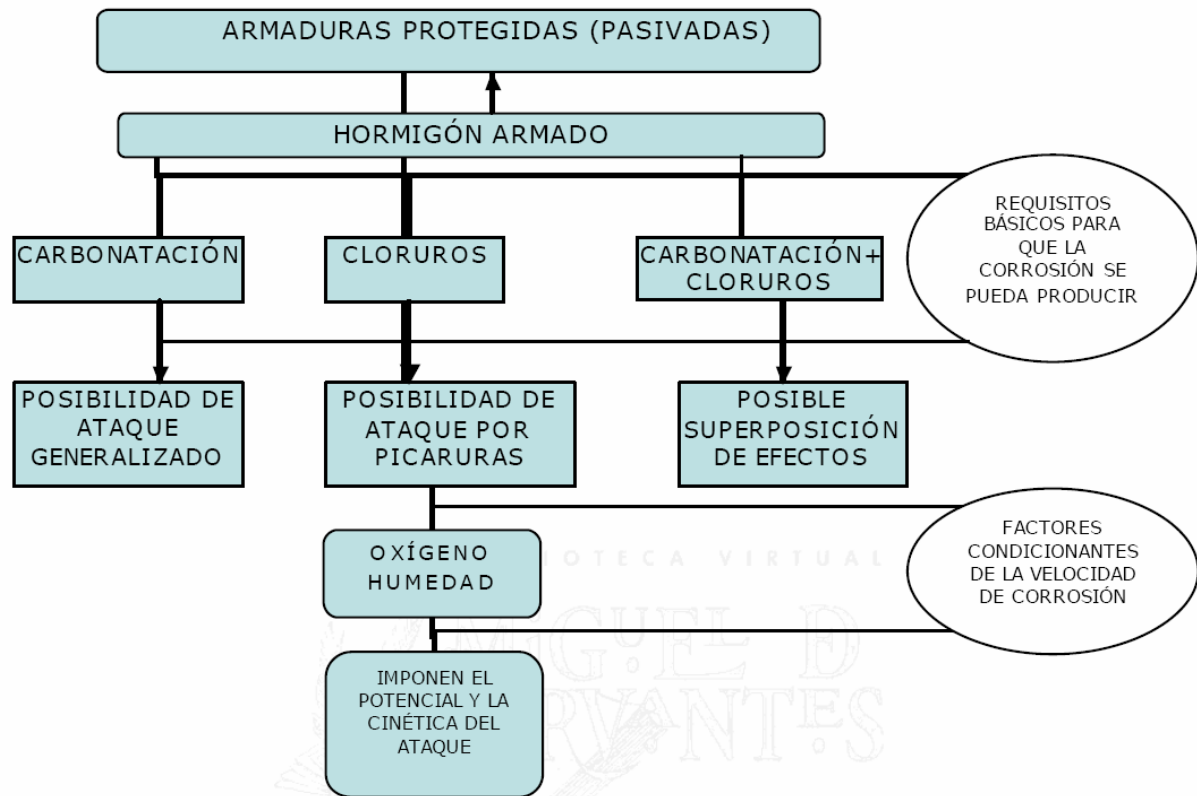


Figura B1. Factores desencadenantes y condicionantes de la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón armado. [13]

Conocer los mecanismos y la velocidad tanto de la carbonatación como del ión cloruro en el hormigón, es fundamental para el diseño del hormigón armado y son factores que intervienen en todos los métodos existentes de predicción de vida en servicio. Nuestra Instrucción EHE-08 no es un caso ajeno, ANEJO nº 9 de la EHE-08. [1]

B.2 Fundamentos de la corrosión

La corrosión es la combinación de un material metálico con el medio circundante, pasando del estado elemental al combinado. Prácticamente, todos los metales que conocemos son obtenidos, a partir de minerales que

los contienen normalmente en forma de óxidos, a través de procesos metalúrgicos más o menos complejos.

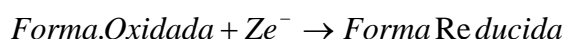
Así a menudo se define como corrosión el proceso mediante el cual el metal vuelve a su estado natural (a un estado oxidado mucho más estable termodinámicamente). Este proceso va acompañado de un descenso de su energía libre de Gibbs, por lo que se produce de forma espontánea.

El mecanismo de la reacción de corrosión en el hormigón armado es por vía electroquímica. Para que se produzca este fenómeno, es necesario, como en cualquier pila electroquímica, la presencia de:

- Una reacción anódica: Disolución del metal.



- Una reacción catódica : Cualquier proceso de reducción



Entre las innumerables reacciones catódicas posibles, la reducción del O_2 y del H_2 son las más frecuentes, y por tanto, responsables de la mayor parte de los procesos de corrosión. La reacción de reducción del H_2 tiene lugar preferentemente en medios ácidos, en los cuales existe una notable concentración de estos iones. En medios neutros o básicos (hormigón) su papel es insignificante, siendo en cambio fundamental para el funcionamiento de las pilas de corrosión la reducción del O_2 , de modo que si falta este elemento. Lo normal es que no haya corrosión. También puede suceder que ciertos medios contengan cationes de metales más nobles que el metal expuesto a su acción, los cuales captan electrones y precipitan sobre las áreas catódicas de la superficie metálica.

- Un electrolito conductor: es el medio material capaz de transportar los iones a su través, de modo que se cierra el circuito de la pila electroquímica. En el caso del hormigón armado, el electrolito es la fase acuosa anteriormente descrita.

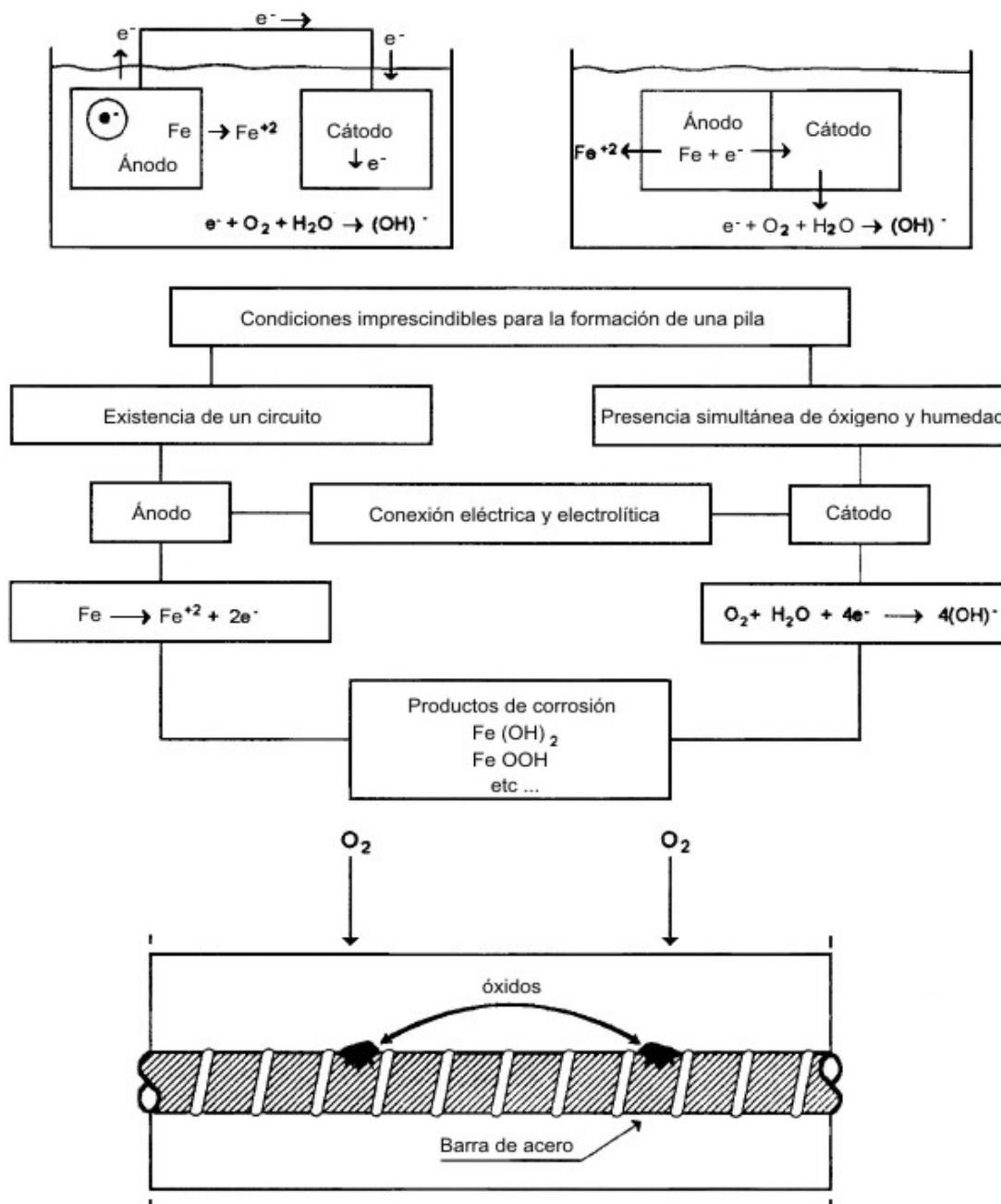


Figura B2 Formación de pila electrolítica. [13]

Sin embargo, la sola presencia de un ánodo, un cátodo y un electrolito conductor no es suficiente en muchas ocasiones para que se produzca el fenómeno de corrosión, sino que depende fundamentalmente del potencial del sistema y del pH. Así, un metal se disuelve con formación de iones metálicos a un potencial dado. A un potencial inferior, no hay disolución y además dicho potencial no es afectado por el pH del medio. Por otra parte,

si el metal se disuelve para obtener óxido o hidróxido, la reacción ocurre a un potencial que depende del pH.

Este hecho ha dado lugar a una representación gráfica, ideada por Pourbaix, en la que se presentan los estados de corrosión de un metal frente al potencial y pH. En la figura B3, se muestra el diagrama de Pourbaix para el hierro. En él se observan tres estados de corrosión:

- Pasivación: en el que el metal se corroe, formando una capa de óxido que lo protege contra posteriores ataques.
- Inmunidad: en el que no se produce el fenómeno de corrosión.
- Corrosión: en el que el metal se ataca, produciéndose una disolución del mismo

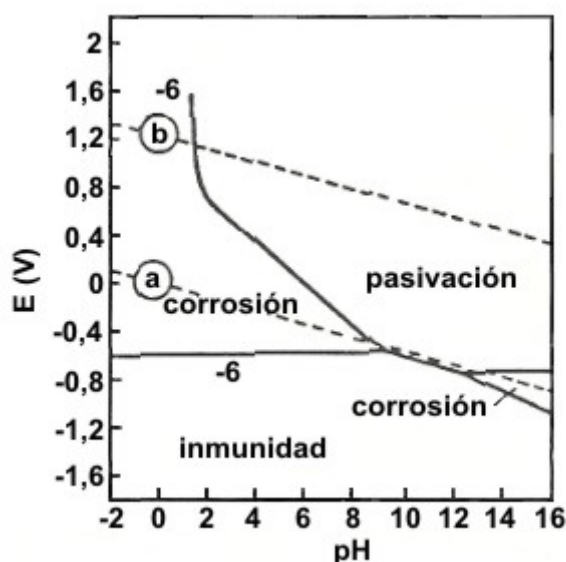
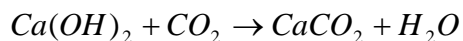


Figura B3: Diagrama de Pourbaix para el hierro [17]

B.3. Carbonatación del hormigón

Las reacciones de carbonatación del hormigón han sido estudiadas con detalle, concretándose en gran medida los procesos que tienen lugar, así como los parámetros que influyen en la reacción.

De una manera simplificada, la reacción química se produce entre el hidróxido cálcico de la fase acuosa del hormigón y el CO₂ ambiental que penetra por los poros:



Este proceso hace que el pH del hormigón disminuya considerablemente, debido a que el hidróxido cálcico en disolución acuosa confiere una basicidad muy elevada (pH entre 12 y 13), y el producto de reacción disminuye el pH hasta valores por debajo de 9.

El CO₂ penetra desde la superficie exterior del hormigón utilizando los poros como vía de acceso. Por tanto se puede afirmar que la carbonatación aumenta con el paso del tiempo.

La carbonatación va avanzando debido a que la concentración de CO₂ en el aire de los poros es constante; a medida que el CO₂ reacciona con el hidróxido cálcico se restablece la concentración en los poros, continuando el ataque.

En condiciones normales de humedad relativa (H.R), la cinética del proceso está controlada por la difusión del CO₂ en el hormigón. Cuanto menos permeable a los gases es el hormigón, más dificultad presenta el fenómeno de la carbonatación (el contenido de dióxido de carbono soluble en aguas superficiales es del orden de 0.54 mg/l).

De una manera simplificada, la profundidad de carbonatación sigue una ley en función de la raíz cuadrada del tiempo.

No obstante, existen numerosos estudios al respecto, algunos de ellos contradictorios, pero sí hay consenso respecto a que se sigue la relación citada en las zonas adyacentes a la superficie exterior del hormigón (si no hay cambios bruscos de humedad)

Considerando estos supuestos, la profundidad de carbonatación seguirá la expresión:

$$D = \sqrt[n]{K \cdot t}$$

Siendo:

- D es la profundidad de la carbonatación.
- K constante que depende de la porosidad y microestructura del hormigón
- t tiempo.
- n =2 (ambiente seco).
- n >2 (ambiente húmedo o con cambios).

Otro factor adicional que incide en la cinética del proceso es la humedad relativa. Se ha observado que la carbonatación se ve favorecida entre 50 y 80 % de H.R ambiental. Este hecho es debido a que para valores más elevados, los poros capilares se saturan de agua y no permiten la difusión del CO₂. Por otro lado, para que se produzca la reacción entre el hidróxido cálcico y el CO₂ es necesario que haya agua, para que pueda transcurrir la reacción de neutralización, de forma que para humedades relativas bajas, el proceso se ve muy dificultado

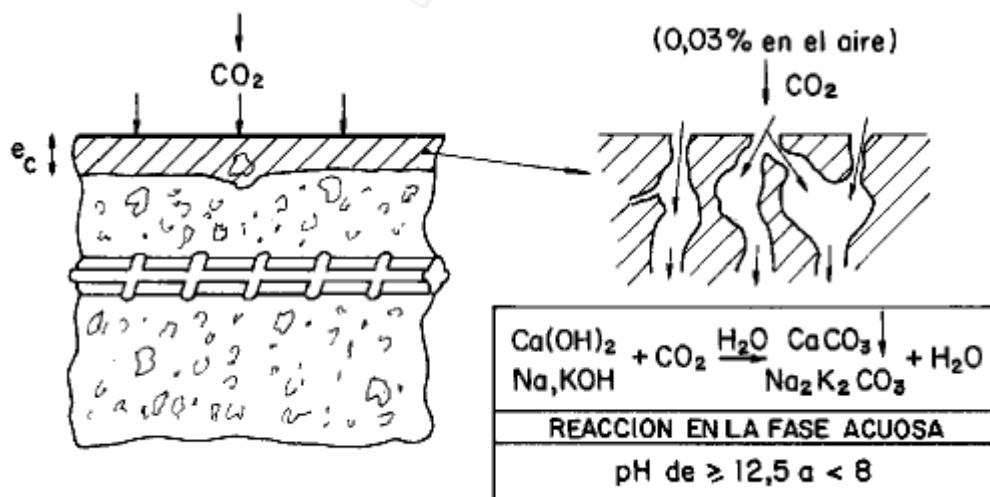


Figura B4 Carbonatación del recubrimiento de hormigón. [17]

Se llama "periodo de iniciación" de la carbonatación al tiempo que tarda en llegar el frente hasta la armadura. Una vez ha llegado dicho frente al acero, la capa pasivante de éste se destruye.

B.4. Difusión de cloruros.

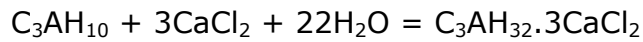
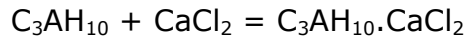
El aporte de cloruros al hormigón puede transcurrir por dos vías:

- Iones disueltos en el cemento, agua, áridos, aditivos o adiciones.
- Transporte desde el medio ambiente por difusión.

En lo que respecta a esta segunda vía, los iones cloruro penetran a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloro disueltos en los poros pueden interaccionar con las fases sólidas del hormigón quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del hormigón puede encontrarse en varios estados:

- Cloruro libre: es el que permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del hormigón mediante difusión u otros mecanismos.
- Cloruro ligado: es el que permanece unido a las fases sólidas del hormigón. este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior del hormigón.
- Cloruro total: es la cantidad total de cloruro que contiene el hormigón, sin hacer distinción entre cloruro libre y ligado. La concentración de cloruro total en un hormigón es igual a la suma de concentraciones de iones libres y ligados.

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros a las fases sólidas son tanto de tipo químico como de tipo físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el C_3A . El aluminato tricálcico reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o "Sal de Friedel" $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_{32} \cdot 3CaCl_2$ según las reacciones:



Este compuesto mantiene ligados los iones, si bien siempre existe un equilibrio tendente a dejar una pequeña concentración de cloros libres.

La capacidad de captación de iones cloruro de la pasta de cemento es muy limitada. Según los estudios de W. Richarz, únicamente puede combinarse cloruros hasta un máximo del 0.4 % respecto al peso de cemento.

Otro factor que incide en la penetración de cloruros es la carbonatación del hormigón. Por un lado es favorable, debido a que la conversión de portlandita en calcita lleva consigo un incremento de volumen del 1%, disminuyendo la porosidad y aumentando las resistencias. El aspecto negativo se fundamenta en que la carbonatación del hormigón lleva consigo una pérdida de la capacidad de unión de los cloruros a la pasta, solubilizando la "sal de Friedel", y aumentando la concentración libre efectiva de iones cloruro.

RESUM:

En els darrers anys s'ha prestat una gran atenció als problemes de durabilitat de les estructures de formigó armat i especialment al problema de la corrosió d'armadures. Tant és així, que la Instrucció de formigó estructural EHE-08 recull com un estat límit més la durabilitat de les estructures i ho fa valorant els dos factors que determinen la corrosió de les armadures: la carbonatació i l'entrada de l'ió clorur en la massa del formigó.

Cal calcular les estructures no solament perquè resistixin sinó també perquè durin.

S'entén per Estat Límit de durabilitat el fet de no aconseguir-ne la vida útil de projecte de l'estructura, com a conseqüència que els processos de degradació del formigó o de les armadures arribin al grau suficient com perquè impedeixin que l'estructura es comporti d'acord amb les hipòtesis amb les quals ha estat projectada. (EHE-08)

Per mantenir les estructures en bon estat de conservació, cal conèixer l'estat real de les mateixes. Aquest coneixement es realitza a través d'inspeccions sistemàtiques i programades.

Com sabem el formigó armat és un dels millors materials de construcció per dos motius principals: la seva resistència i la seva durabilitat en el temps. No obstant això són moltes les patologies que pot patir i moltes les agressions ambientals a què està sotmès. L'ús cada vegada major de sals de desgel a les nostres carreteres i la contaminació de les ciutats, són factors que poden alterar significativament el grau de durabilitat d'una estructura.

La major part de les patologies que pateix el formigó armat es manifesten quan el grau de deteriorament és gran o millor dit, quan el període d'iniciació de la patologia ja està esgotat i comença el període de propagació.

Normalment, la corrosió de les armadures es detecta per la presència de fissures, esquerdes o escrostonats en el formigó, sent pràcticament impossible una detecció precoç.

Així, aquest projecte planteja com a objectiu principal avaluar la conveniència o no d'introduir en els propis treballs d'inspecció la mesura de potencials pel mètode de mitjana pila.

Per això s'han realitzat una sèrie de mostres, s'han analitzat els resultats i s'ha valorat el seu cost.

Dels resultats obtinguts s'arriba a la conclusió que la mesura de potencials pel mètode de mitjana pila determina les zones d'activitat de corrosió de les armadures i aquest coneixement permet desenvolupar estratègies encaminades a millorar la conservació de les estructures.