



**INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA**

**PROF. JORGE A. SABATO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL  
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN  
CIENCIA Y  
TECNOLOGIA  
DE MATERIALES**

**APLICACIÓN DE LA GAMMAGRAFÍA  
PARA EL ESTUDIO DE LA CORROSIÓN  
DEL ACERO EN ESTRUCTURAS  
DE HORMIGÓN ARMADO**

**Natalia M. Gaillard**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN  
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA  
"Prof. Jorge A. Sabato"

**Aplicación de la gammagrafía para el estudio de la  
corrosión del acero en estructuras de hormigón armado (\*)**

**Ing. Natalia Gaillard**

**Director**

**Dr. Gustavo Duffó  
Dr. Mario Mariscotti**

(\*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencias y Tecnología de Materiales*

**República Argentina**

**2013**



## AGRADECIMIENTOS:

Muchas personas han contribuido en este trabajo. Desearía agradecer a todos los que lo han leído y me ofrecieron sus comentarios y sugerencias.

- En primer lugar, quiero agradecer el apoyo incondicional de mis padres: Nancy y Juan Gaillard, de mis hermanos: Juan Pablo, Federico y Alexis Gaillard. También quisiera agradecer el apoyo entusiasta y la ayuda proporcionada por Néstor Hidalgo, cuyas sugerencias e intervenciones mejoraron el texto de muchas maneras. A mi familia en general, abuelos, tíos, primos, por escuchar pacientemente cada uno de mis descubrimientos. A mis amigos, por haber dedicado parte de su tiempo en leer y opinar, aunque el tema elegido no fuera de su especialidad. En fin, a todos los que me escucharon y aconsejaron en cada etapa del desarrollo del presente trabajo.

- Fue una fortuna para mí contar con dos directores de gran talla, como lo son Gustavo Duffó y Mario Mariscotti, a ellos mis más sinceros agradecimientos por haberme permitido aprender y crecer a su lado.

- A la a la Comisión Nacional de Energía Atómica, a los profesores y personal administrativo que conforman el Instituto Prof. Jorge A. Sabato, por la valiosa oportunidad brindada para realizar esta Maestría.

- Por último, deseo agradecer también, la colaboración de: Marcelo Ruffolo, Claudio Lafont, Mariel Reinoso, Cinthia Ramos, Daniel Vega y a los responsables del microscopio de barrido electrónico, por haber dedicado parte de su tiempo en ayudarme a fabricar y caracterizar mis probetas.

A todos ellos, muchas gracias.

Natalia Gaillard

## RESUMEN

La corrosión de las barras de refuerzo es una de las principales causas del deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado. Inicialmente, debido a la alta alcalinidad de la solución contenida en los poros del hormigón ( $\text{pH} > 13$ ), las barras de acero se encuentran pasivadas por la presencia de una película de óxido protectora. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, esta protección se rompe por la destrucción de la película pasiva generada por la presencia de iones agresivos (cloruro, por ejemplo) o por la acidificación del medio en las proximidades de la barras de acero (carbonatación).

Bajo condiciones naturales, el proceso de corrosión de las barras de refuerzo es muy lento y, generalmente, las primeras evidencias de deterioro aparecen luego de muchos años de exposición, por lo que los ensayos requieren de largos tiempos de exposición. Por tal motivo, hay una tendencia de llevar a cabo lo que se denomina “ensayos de corrosión acelerados”, de manera de obtener resultados en el corto plazo. La corrosión acelerada por medio de la técnica de corriente impresa es ampliamente utilizada en estudios de durabilidad del hormigón, ya que posee la ventaja de que los ensayos pueden llevarse a cabo dentro de períodos de tiempo razonables. En el presente trabajo, a través de la realización de ensayos de corrosión acelerada, se determinó la densidad de corriente de corrosión aplicada y los daños generados sobre las armaduras de acero mediante la aplicación de microscopía óptica y electrónica de barrido y determinaciones gravimétricas y micrométricas. Además, se analizaron las probetas corroídas por medio de gammagrafía. Los resultados muestran que la eficiencia de la corriente aplicada está comprendida entre 1 y 77%, independientemente de la densidad de corriente aplicada. Por otro lado, se encontró que el contenido de cloruro presente en el cemento, más la cantidad proveniente de la arena, fue suficiente para generar corrosión localizada del acero embebido en el mortero, hecho que quedó justificado al analizar el diagrama de Pourbaix para el sistema  $\text{Fe}/\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{O}$  y al identificar al producto de corrosión mayoritario como *akaganeita*, el cual solo se forma en presencia de  $\text{Cl}^-$ . Finalmente, utilizando la técnica de gammagrafía, cuyo límite de detección en las condiciones experimentales del presente trabajo fue de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , se encontró que la relación existente entre la profundidad del ataque localizado y el ataque generalizado es del orden de 3.

**Palabras claves:** Hormigón armado, acero, corrosión acelerada, gammagrafía.

## ABSTRACT

The corrosion of rebars is a major cause of premature deterioration of reinforced concrete structures. Initially, due to the high alkalinity of the solution contained in the pores of the concrete ( $\text{pH} > 13$ ), the steel bars are passivated by the presence of a protective oxide film. However, under certain circumstances, this protection is broken by destruction of the passive film generated by the presence of aggressive ions (chloride, for example) or by the acidification of the medium in the vicinity of the steel rods (carbonation).

Under natural conditions, the corrosion process of reinforcing bars is very slow and usually the first signs of deterioration appear after many years of exposure, so the tests require long exposure times. Therefore, there is a tendency to perform what is called "accelerated corrosion tests", in order to obtain results in the short term. The accelerated corrosion by the impressed current technique is widely used in studies of concrete durability since it has the advantage that essays can be carried out within reasonable periods of time. In this work, through the implementation of accelerated corrosion tests, we investigated the corrosion current density applied and resulting damage on the reinforcing steel by applying optical microscopy and scanning electron microscopy and gravimetric analysis and micrometer. In addition, we analyzed the specimens corroded by gammagraphy. The results show that the efficiency of the applied current is between 1 and 77%, regardless of the applied current density. Furthermore, it was found that chloride content present in the cement plus the amount from the sand, was sufficient to generate localized corrosion of steel embedded in the mortar, which was often justified by analyzing the Pourbaix diagram for the system  $\text{Fe}/\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{O}$  and to identify the major corrosion product as *akaganeite*, which only forms in the presence of  $\text{Cl}^-$ . Finally, using the technique of gammagraphy, the detection limit under the experimental conditions of this work was approximately  $100 \mu\text{m}$ , we found that the relationship between the depth of localized attack and generalized attack is about 3.

**Key words:** Reinforced concrete, steel, artificial corrosion, gammagraphy.



## ÍNDICE

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1: Introducción</b>                                    | <b>1</b>  |
| 1.1 El hormigón armado                                             | 1         |
| 1.2 Corrosión de las armaduras del hormigón armado                 | 6         |
| 1.2.1 Efecto de la corrosión en las estructuras de hormigón armado | 11        |
| 1.3 Modelos del proceso corrosivo                                  | 17        |
| 1.4 Ensayos de corrosión acelerada                                 | 18        |
| 1.5 Determinación cuantitativa del daño por corrosión              | 20        |
| 1.5.1 Técnicas gravimétricas                                       | 21        |
| 1.5.2 Gammagrafía                                                  | 22        |
| 1.6 Objetivos del trabajo                                          | 25        |
| Referencias:                                                       | 26        |
| <b>CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos</b>                            | <b>28</b> |
| 2.1 Preparación de probetas                                        | 29        |
| 2.2 Ensayos de corrosión acelerada                                 | 36        |
| 2.3 Análisis por gammagrafía                                       | 38        |
| 2.4 Análisis de gravimetría                                        | 39        |
| 2.5 Otros estudios realizados                                      | 41        |
| 2.5.1 Espectroscopía Raman                                         | 41        |
| 2.5.2 Espectroscopía Mossbauer                                     | 42        |
| Referencias                                                        | 44        |
| <b>CAPÍTULO 3: Resultados</b>                                      | <b>45</b> |
| 3.1. Curvas de polarización                                        | 46        |
| 3.2 Ensayos de corrosión acelerada                                 | 47        |
| 3.3 Análisis por gammagrafía                                       | 54        |
| 3.4 Análisis por gravimetría                                       | 64        |
| 3.5 Caracterización de los productos de corrosión                  | 70        |
| 3.5.1 Microscopía electrónica de barrido                           | 70        |
| 3.5.2 Espectroscopía Raman                                         | 73        |
| 3.5.3 Espectroscopía Mossbauer                                     | 76        |
| Referencias                                                        | 78        |
| <b>CAPÍTULO 4: Discusión</b>                                       | <b>80</b> |
| 4.1 Curvas de polarización                                         | 81        |



---

|                                              |           |
|----------------------------------------------|-----------|
| 4.2 Corrosión acelerada .....                | 84        |
| 4.2.1 Eficiencia de corriente .....          | 84        |
| 4.3 Ensayos de gammagrafía .....             | 90        |
| Referencias .....                            | 93        |
| <b><u>CAPÍTULO 5: Conclusiones</u></b> ..... | <b>95</b> |



## PRESENTACIONES A CONGRESOS

- “Aplicación de la gammagrafia para el estudio de la corrosión del acero en estructuras de hormigón armado”, N. Gaillard, G. S. Duffó y M. Mariscotti, 4to Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Mar del Plata, Buenos Aires (2012).
- “Aplicación de la gammagrafia para el estudio de la corrosión del acero en estructuras de hormigón armado”, N. Gaillard, G. S. Duffó y M. Mariscotti, 12º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET, Valparaíso, Chile (2012).

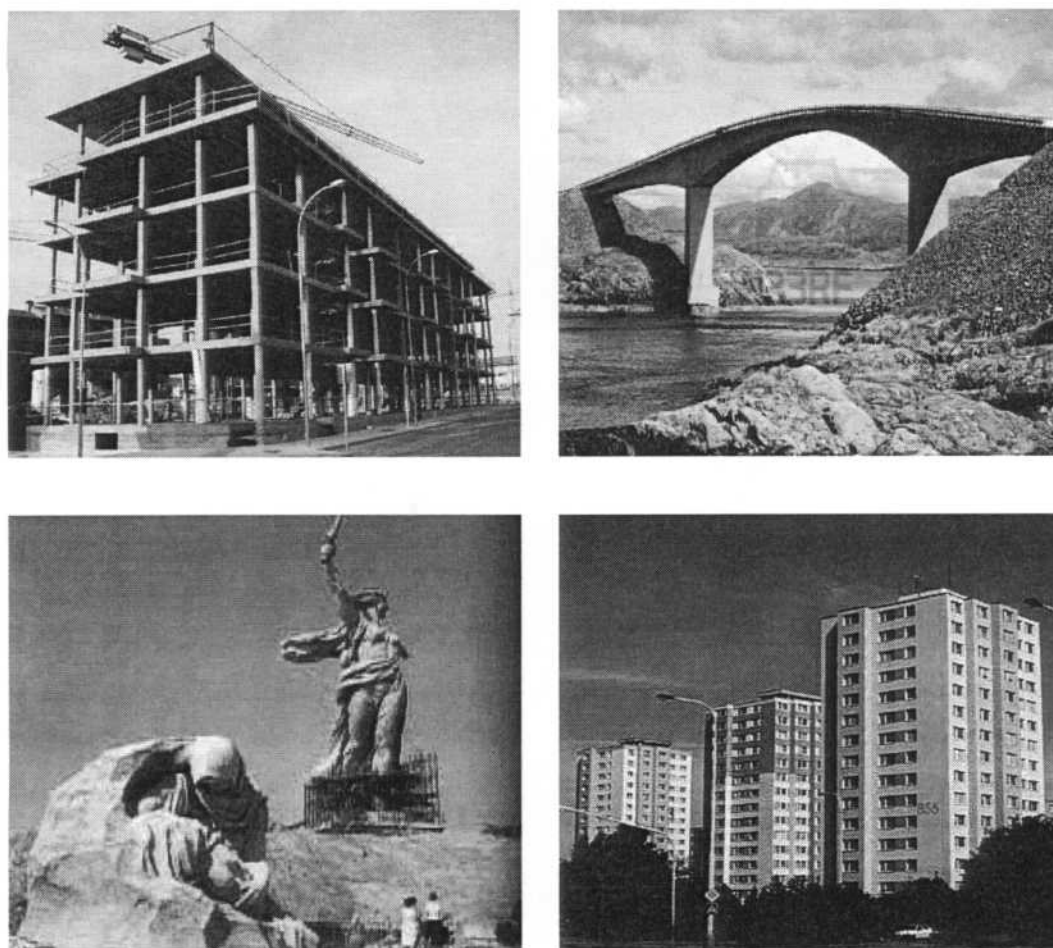
# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

## 1.1 El hormigón armado

El hormigón es uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción actual. Su empleo va desde pequeñas reparaciones hasta las grandes obras civiles que comenzaron a construirse desde principios del siglo XX con el comienzo de la fabricación industrial del cemento portland.

Se estima que en el mundo se consumen al año alrededor de 4500 millones de toneladas de hormigón, es decir, 5 veces más que de acero. Esto se debe a su gran versatilidad en formas, acabados y tamaños; excelentes propiedades mecánicas; elevada durabilidad frente a determinados agentes que resultan agresivos para otros materiales; fácil disponibilidad y bajo costo relativo [1] (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Ejemplo de la utilización cotidiana del hormigón armado.

El hormigón está formado mayoritariamente por una mezcla de cemento, arena, agregado grueso (canto rodado, piedra granítica u otro tipo de áridos) y agua. La estructura y composición de la pasta de cemento determinan su durabilidad y el desempeño a largo tiempo del hormigón. Por su parte, el hormigón armado (o reforzado) es una matriz de hormigón que contiene barras de acero en su interior. La protección que el hormigón provee al acero integrado y, más en general, su habilidad para soportar varios tipos de degradación, también depende de su estructura. Las excelentes propiedades de hormigón armado se deben a la combinación de la resistencia a la compresión, propia del hormigón, y a la alta resistencia a la tracción que le confiere el acero.

Además de las ventajas estructurales que resultan de la combinación de ambos materiales, el hormigón actúa como barrera física de las armaduras respecto del medio ambiente y posee características químicas que le ofrecen al acero una apropiada protección contra la corrosión, ya que la durabilidad de las estructuras de hormigón armado es el resultado natural de la acción protectora, de doble naturaleza, que el hormigón ejerce sobre el acero, (Figura 1.2). No obstante ello, se comprobó que con el tiempo el hormigón armado se deteriora, tanto debido a procesos de degradación del propio hormigón, como por la corrosión de las armaduras.



Figura 1.2: Doble acción protectora del hormigón sobre las barras de refuerzo.



Cuando el cemento se mezcla con el agua, sus distintos componentes se hidratan formando un conglomerado sólido, constituido por las fases hidratadas del cemento, y una fase acuosa que proviene del exceso de agua de amasado necesaria para la mezcla adecuada de todos sus componentes. El hormigón resulta pues, un sólido compacto y denso pero poroso. La red de poros es un entramado de canales y capilares no siempre comunicados entre sí, pero que permiten que el hormigón presente una cierta permeabilidad a los líquidos y los gases. Así, aunque el recubrimiento de la armadura supone una barrera física, ésta es permeable, en cierta medida, y permite el ingreso de elementos agresivos hasta el acero [2].

El cemento llamado *portland* es el aglomerante de uso más extendido el cual, cuando se mezcla con agua, forma una pasta capaz de fraguar y endurecer en forma progresiva. Por este motivo se lo llama *aglomerante hidráulico* (cales o cementos hidráulicos), para distinguirlos de los *aglomerantes aéreos*, en los que el endurecimiento se produce en contacto con el aire.

El cemento portland se obtiene por molienda de su clínquer con yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , sulfato de sodio dihidratado) como regulador de fraguado. El clínquer es el producto obtenido por cocción a  $1500^\circ\text{C}$  hasta fusión parcial de una mezcla de caliza (carbonato de calcio) y arcilla (silicatos de aluminio) homogeneizada y en proporciones adecuadas.

Los constituyentes fundamentales del clínquer son:

- Silicato tricálcico (*Alita*)  $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$
- Silicato dicálcico (*Belita*)  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$
- Aluminato tricálcico  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$
- Aluminoferrito tetracálcico (*Celita*)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$

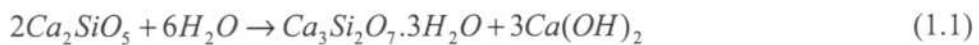
El cemento también puede contener adiciones llamadas “activas” por su capacidad hidráulica, como puzolanas (cenizas del tipo volcánico), cenizas volantes (cenizas pulverizadas de carbón de piedra) o escorias de alto horno.



En presencia de agua, los compuestos cristalinos anhidros que constituyen el cemento, se hidratan produciéndose una cristalización que conduce a un sistema de constituyentes hidratados estables, con un desprendimiento mayor o menor de calor en función del tipo de cemento.

Por fraguado del cemento se entiende el instante en que la viscosidad de la mezcla cementícea fresca aumenta bruscamente. Posteriormente, el proceso de hidratación del cemento continúa desarrollándose muy lentamente y, en consecuencia, propiedades tan importantes como la resistencia mecánica y la permeabilidad varían a lo largo del tiempo. Si no existen interacciones desfavorables con el entorno, estas propiedades mejoran con el tiempo, siendo el hormigón cada vez más resistente y menos permeable [1].

De los compuestos minerales presentes en el clínquer, los que se encuentran en mayor proporción son los silicatos de calcio, que reaccionan con el agua y se endurecen por hidratación de los distintos compuestos que lo constituyen. La reacción típica de hidratación se muestra en la ecuación (1.1):



Durante este proceso de hidratación ocurren, entre otros, los siguientes fenómenos:

- a) conformación de la red de silicatos, que determina la resistencia mecánica del hormigón;
- b) segregación de hidróxido de calcio, originando una solución que, junto con los álcalis provenientes de las materias primas y otros presentes en pequeñas cantidades en los poros (NaOH y KOH) llevan al pH de la fase acuosa de los poros a valores extremadamente alcalinos (mayores que 13);
- c) evaporación del agua en exceso, agregada durante el amasado para hacer trabajables las mezclas, lo cual genera una red de poros y canales que llegan hasta la superficie del hormigón.



Estos procesos determinarán, en gran medida, el desempeño final del material, por lo cual la formulación, ejecución y curado del hormigón deben ser cuidadosos. Por ejemplo, la cantidad de agua agregada tiene una gran influencia sobre la calidad del hormigón obtenido. Esto es debido a que la cantidad de agua añadida a la mezcla de áridos y cemento para obtener un hormigón de trabajabilidad conveniente es siempre superior a la necesaria para la hidratación completa del cemento anhidro. Sin embargo, se debe evitar su exceso porque aumentará la porosidad del hormigón endurecido y con ello, disminuirá su resistencia a la compresión. Por otra parte, es de destacar que el agua constituye la fase contenida en los poros, donde los principales iones presentes son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

En cuanto al curado, es necesario que la mezcla contenga la cantidad de agua necesaria para que esté siempre disponible para que se lleve a cabo la reacción (1.1), hasta que el hormigón alcance la resistencia esperada. Posteriormente, la red de poros originada durante el curado hace que el hormigón sea relativamente permeable a líquidos y gases.

El tamaño de los poros puede variar desde unos pocos nanómetros hasta algunos milímetros. El volumen y su distribución dependerán, fundamentalmente, de la relación agua/cemento de la mezcla, la forma y el tiempo de curado, la introducción de aire en la mezcla, la compactación, etc. En una primera aproximación, puede decirse que la resistencia mecánica del hormigón es directamente proporcional al contenido de cemento e inversamente proporcional a la porosidad.

La alcalinidad del hormigón es debida, principalmente, al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento, y a los hidratos de sodio y potasio provenientes de las materias primas. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12,6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra pasivado, recubierto de una capa de óxido transparente, compacta y continua que lo mantiene protegido por períodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el hormigón, siempre y cuando el hormigón sea de buena



calidad, no esté fisurado y no cambien sus propiedades fisicoquímicas por agresiones externas [3].

### **1.2 Corrosión de las armaduras del hormigón armado**

El hormigón armado puede sufrir varios procesos que conducen a su deterioro. Estos procesos pueden clasificarse en físicos, químicos y corrosión de armaduras. Entre los procesos de deterioro físicos, cabe mencionarse:

- Desgaste de la superficie: a) abrasión,  
b) cavitación, etc.
- Agrietamiento: a) Cambios de volumen producto de presión de cristalización de sales en los poros, así como gradientes de temperatura y humedad,  
b) Cargas estructurales: Cargas de impacto y cíclicas,  
c) Exposición a temperaturas extremas: Fuego o congelamiento.

Por otro lado, entre las causas químicas del deterioro se pueden mencionar:

- Hidrólisis de los componentes de la pasta de cemento por el agua,
- Reacciones de intercambio de cationes entre la pasta y fluidos agresivos,
- Reacciones que provocan expansiones en el material.

La corrosión de las armaduras de acero en el hormigón armado es la causa más frecuente del deterioro de estructuras construidas con este material. La corrosión del acero en el hormigón es un proceso electroquímico, en el cual el electrolito es la humedad presente.

El proceso de corrosión de las barras de acero empotradas en el hormigón es el resultado de la formación de una celda electroquímica, que consta, en un esquema simplificado, de cuatro elementos principales [2]:

- Oxidación del hierro (proceso anódico) que libera electrones en la fase metálica y da lugar a la formación de iones hierro (II) (ecuación 1.2)



cuya hidrólisis produce acidez (ecuación 1.3)



- Reducción del oxígeno (proceso catódico) que consume los electrones generados en (1.2) y produce alcalinidad (ecuación 1.4)



- Transporte de electrones dentro del metal desde las regiones anódicas hacia las regiones catódicas donde se consumen
- Finalmente, y para completar el circuito, el flujo de corriente eléctrica dentro del hormigón entre las regiones anódicas y las catódicas, transportada por los iones en la solución de los poros, a efectos de mantener la electroneutralidad del sistema.

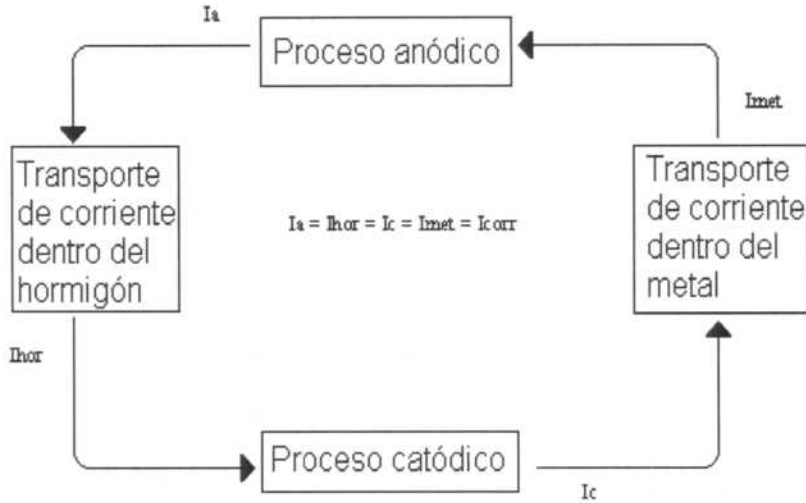
La reacción total se puede resumir según (ecuación 1.5):



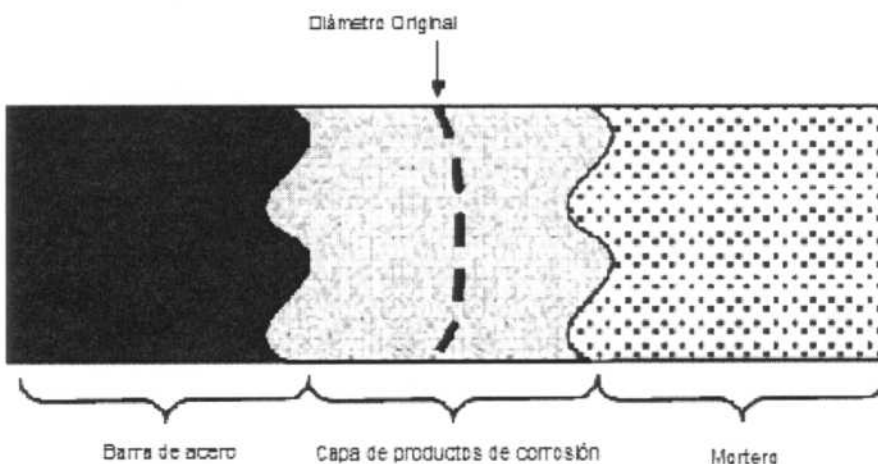
Estos cuatro procesos son complementarios, es decir, que ocurren a la misma velocidad (Figura 1.3):

Cabe resaltar que para que se produzca el proceso es necesaria la presencia de oxígeno y de agua en la estructura porosa del hormigón para formar el electrolito. Como consecuencia de las interrelaciones mencionadas, la corrosión no puede desarrollarse en hormigones secos (no se forma el electrolito) ni en hormigones saturados (por insuficiencia de oxígeno)

a pesar de que la película pasiva se destruya por cualquier mecanismo [1]. En la Figura 1.4 se esquematiza el efecto la pérdida de diámetro que sufren las barras de acero.

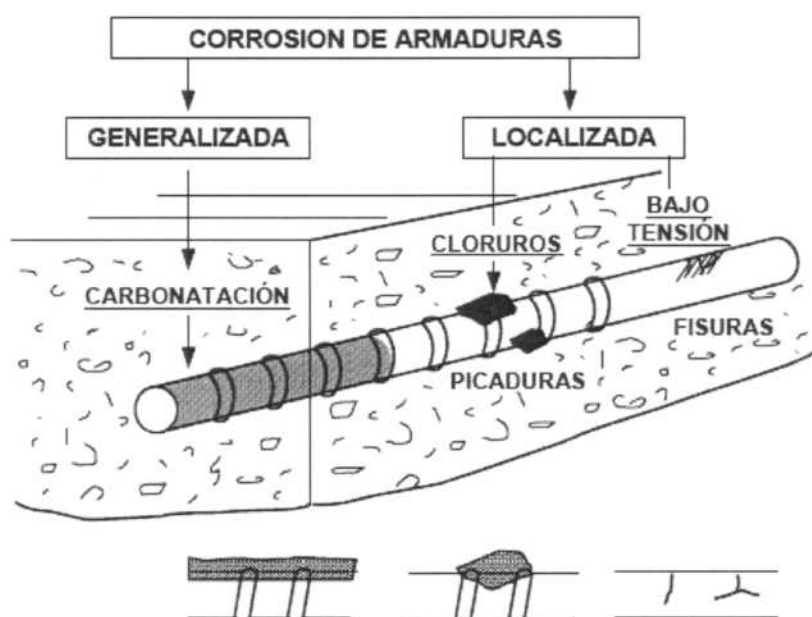


**Figura 1.3:** Esquematización del proceso corrosivo.  $I_a$ , corresponde a la corriente anódica: número de electrones liberados por la reacción anódica por unidad de tiempo.  $I_c$ , corresponde a la corriente catódica, número de electrones consumidos en la reacción catódica.  $I_{hor}$ , corresponde a la corriente que circula dentro del hormigón.  $I_m$ , corresponde a la corriente que circula dentro del metal.  $I_{corr}$ , corresponde al valor común a todas las corrientes anteriores que, en unidades electroquímicas, da la velocidad del proceso general de corrosión.



**Figura 1.4:** Pérdida de diámetro debido al proceso corrosivo.

Las principales causas de corrosión en el hormigón armado son: la disminución de la alcalinidad del medio que conduce a la corrosión generalizada de la armadura, la presencia de iones cloruro provenientes del medio externo o incorporados durante la etapa de amasado del hormigón, que conducen a la corrosión localizada del acero, y la corrosión bajo tensión (Figura 1.5), aunque este último fenómeno solo ocurre en los hormigones pre y postensados.



**Figura 1.5:** Tipos de corrosión que se pueden producir en estructuras de hormigón armado.

La corrosión generalizada se produce por un descenso en la alcalinidad del hormigón, que puede deberse al contacto con aguas blandas, o por la reacción de los compuestos de carácter básico de la fase acuosa del hormigón, ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  y  $\text{Ca(OH)}_2$ ) con los componentes ácidos de la atmósfera ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.).

Al disminuir el pH hasta valores por debajo de 9, la película pasiva deja de ser estable, pasando a ser termodinámicamente posible la disolución del hierro, de forma tal que la armadura se disuelve en forma generalizada. Los productos de corrosión generados tienen



un volumen mayor que el del hierro del cual provienen, por lo que ejercen presión sobre el recubrimiento de hormigón (que no soporta tensiones de tracción) hasta provocar fisuras, descascaramientos y delaminaciones.

La corrosión localizada es un tipo de corrosión en la que el ataque se produce en zonas muy pequeñas, en algunos casos imposibles de detectar, y la cantidad de material disuelto no guarda ninguna relación con el daño que puede ocasionar.

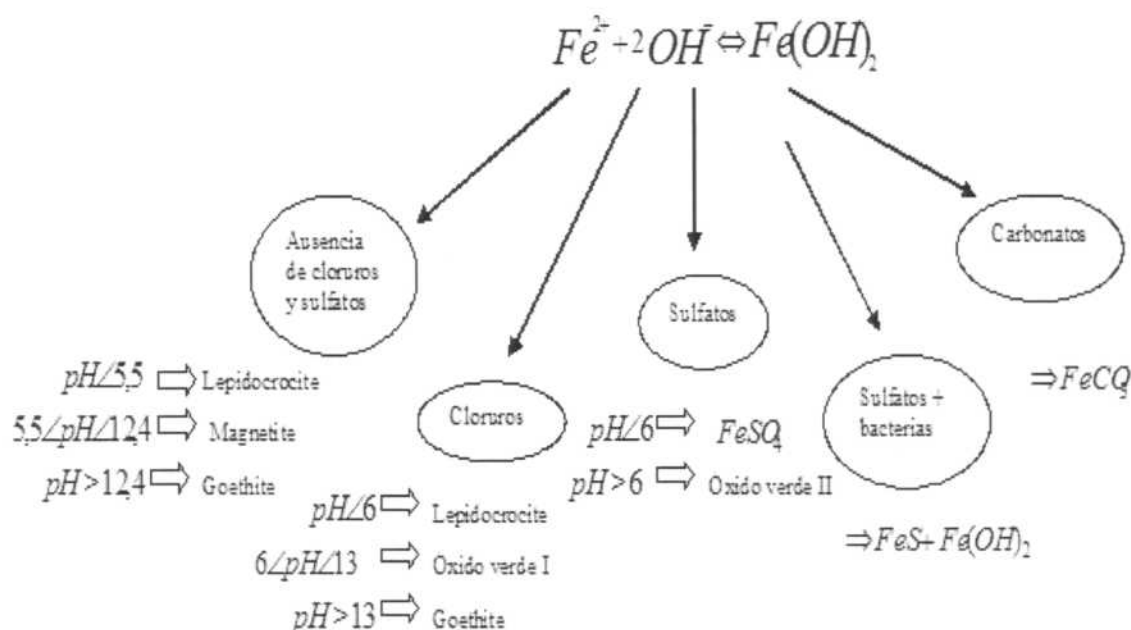
Para el caso del hormigón, hay varios agentes desencadenantes de la corrosión localizada, pero los más habituales son los iones despasivantes, que generan rupturas en la película pasiva, y que provienen de las materias primas, de aditivos, o por penetración desde el exterior. La situación más agresiva y la responsable del mayor número de casos de corrosión localizada en el hormigón armado es debida a la presencia de cloruros. Los iones cloruro tienen la propiedad de destruir en forma puntual la capa pasivante, lo que provoca picado.

Otro tipo de deterioro relacionado con la corrosión de las armaduras es la corrosión por rendijas, que ocurre cuando en la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente pequeño como para impedir la renovación del electrolito en contacto con el metal, donde el ataque progresa a altas velocidades, con un mecanismo similar al del picado.

La corrosión bajo tensión se da en armaduras que están sometidas a tensiones de tracción elevadas (armaduras activas: pretensado o postensado). Las pequeñas impurezas superficiales del acero, junto con la acción localizada de los agentes agresivos, pueden inducir una microfisura. Esta fisura se propaga hasta un valor en el que la tenacidad del material es superada y se produce una rotura frágil de la barra de acero [1].

Es importante destacar que es necesaria la presencia de humedad para que todos estos fenómenos de corrosión tengan lugar, ya que el agua es imprescindible porque no solo permite la movilidad de los iones a través del electrolito, sino que también interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno en medios neutros o básicos.

Cuando se disuelve la capa pasiva del acero las barras embebidas en el hormigón se corroen, y se forman productos de corrosión en su superficie (Figura 1.6) [5].

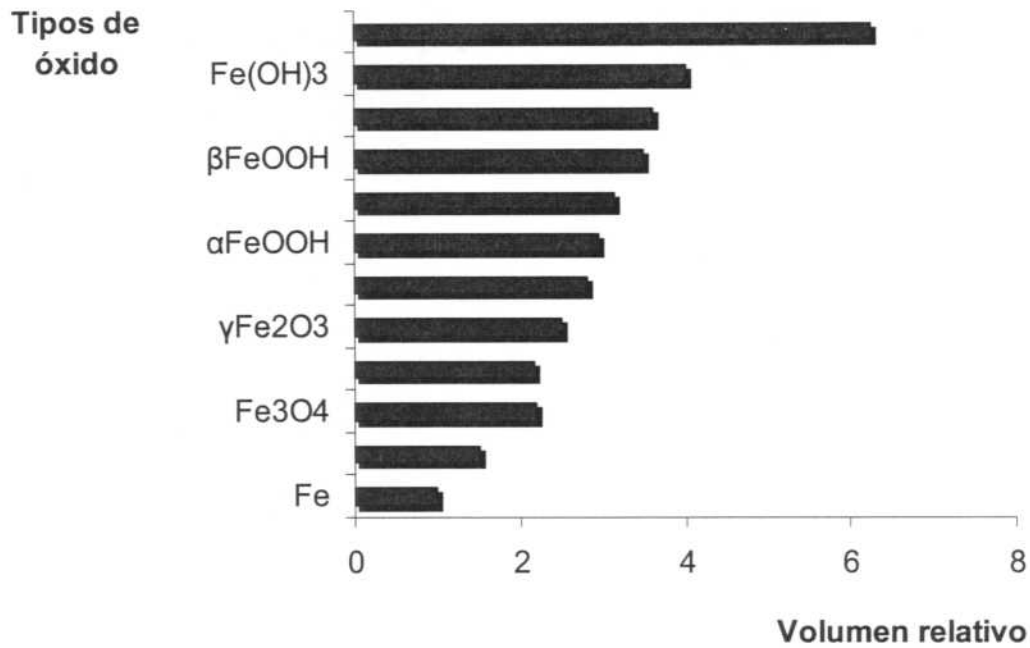


**Figura 1.6:** Tipos de productos de corrosión formados en función del pH y de la presencia de ciertos aniones.

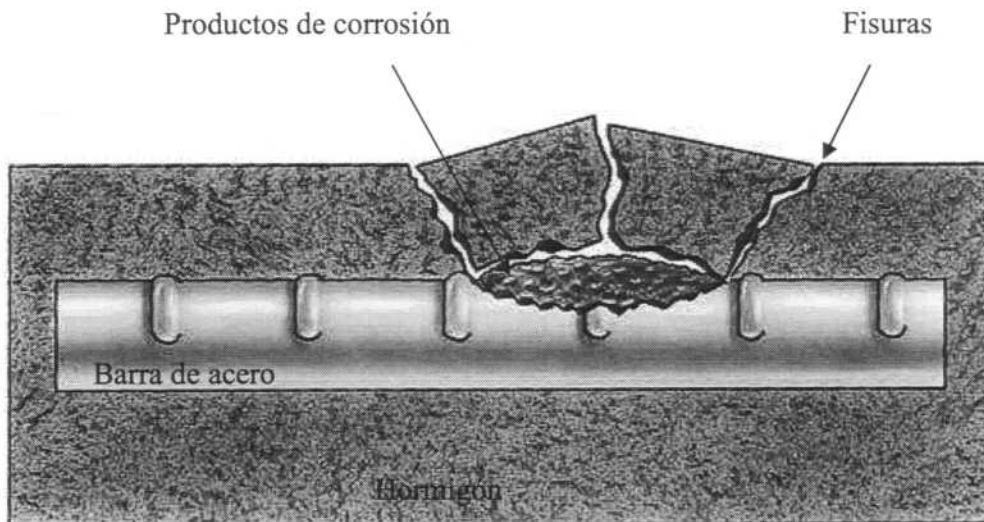
### 1.2.1 Efecto de la corrosión en las estructuras de hormigón armado

Los productos de corrosión tienen un mayor volumen que las especies que le dan origen (Figuras 1.7) por esta razón, crean fuerzas expansivas que originan tensiones de tracción que el hormigón no alcanza a soportar y producen fisuras (Figuras 1.8 y 1.9) [5].

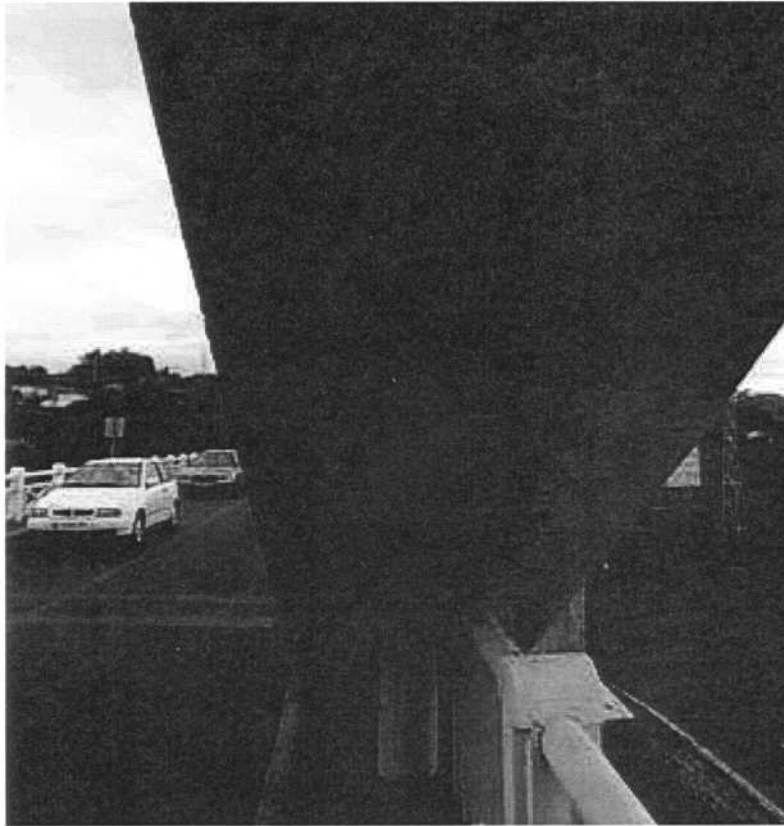
Debe mencionarse que los productos de corrosión tienen distintas densidades, por lo cual algunos pueden, mientras exista espacio suficiente, expandirse dentro de la red porosa del hormigón, o hacia el exterior de los poros interconectados al medio ambiente, no originando, consecuentemente, tensiones de niveles significativos. En la Figura 1.10 se esquematiza el proceso de fisuración del hormigón de recubrimiento [7].



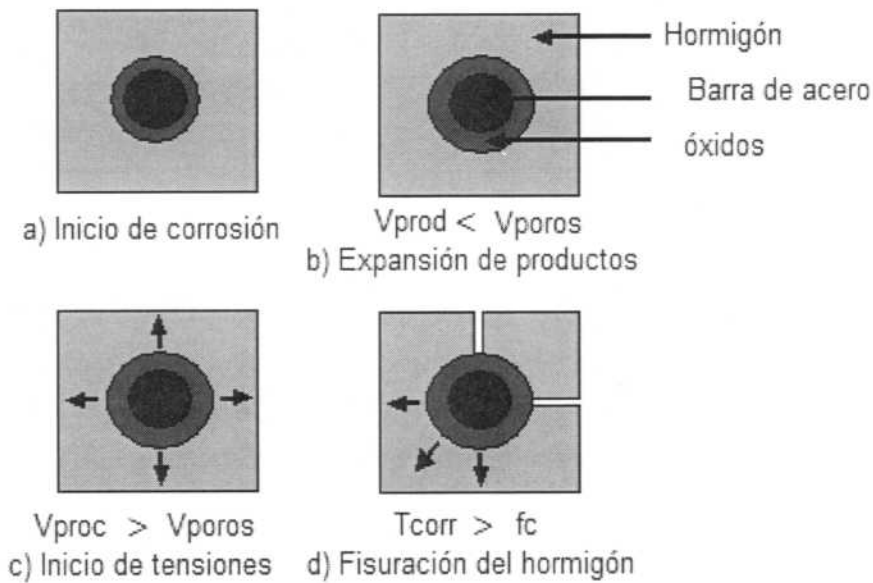
**Figura 1.7:** Volumen relativo de distintos tipos de compuestos de hierro.



**Figura 1.8:** Esquema de la fisuración del hormigón debida a los productos de corrosión.



**Figura 1.9:** Fisuras en el arco central del Puente del Pedrido, España [6].



**Figura 1.10:** Esquema de fisuración del hormigón de recubrimiento.

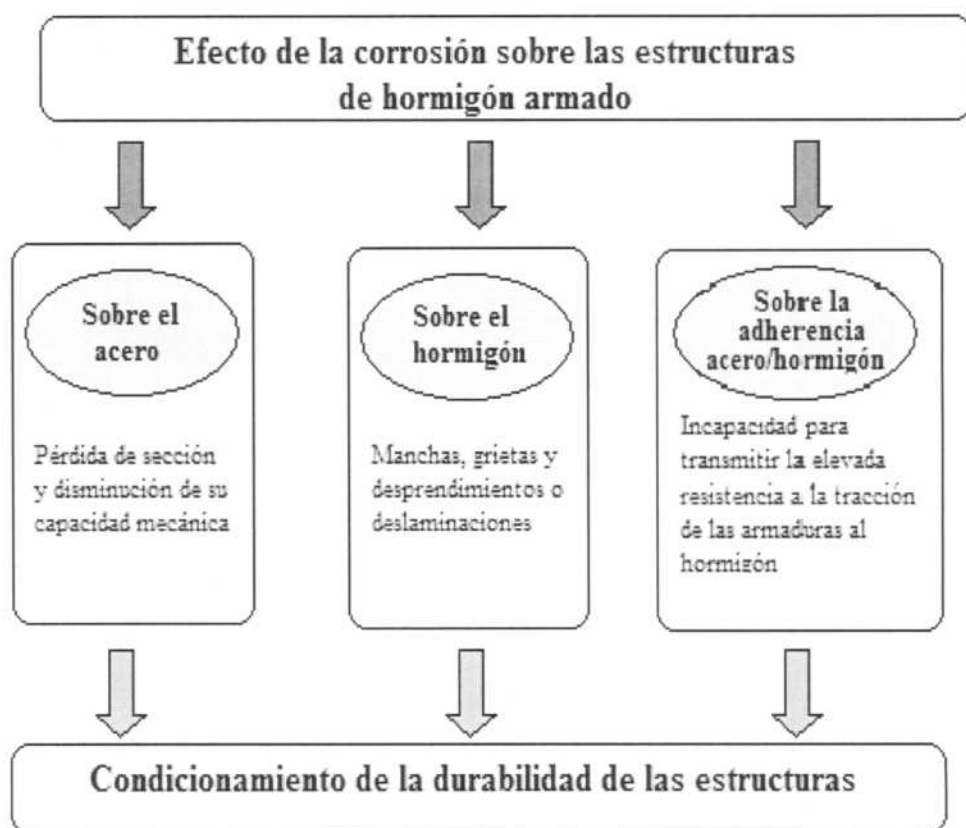
Iniciada la corrosión, los óxidos se expanden en los espacios libres del hormigón (poros capilares y oquedades), cuyo volumen,  $V_{\text{poros}}$ , depende fundamentalmente de: la razón agua/cemento, el grado de hidratación, la presencia de adiciones, los aditivos empleados y del grado de compactación y curado del hormigón. Cuando el volumen de los productos de corrosión,  $V_{\text{prod}}$ , es mayor que el  $V_{\text{poros}}$ , se originan tensiones,  $T_{\text{corr}}$ , las cuales se incrementan a medida que aumenta el  $V_{\text{prod}}$ . Si dichas tensiones superan la resistencia a la tracción del hormigón,  $f_c$ , se produce la fisuración.

El carácter expansivo de los óxidos y la baja resistencia a la tracción del hormigón hace que pérdidas pequeñas de diámetro, sin importancia desde el punto de vista de la resistencia estructural, sean suficientes para fisurar el material. La fisuración depende, también, de otras causas, entre las cuales se pueden citar:

- a) Relación espesor de recubrimiento/diámetro de la armadura: A mayor relación (mayor espesor para igual diámetro de barra), aumenta el tiempo de fisuración del material.
- b) Presencia de armaduras transversales: Estas armaduras pueden tomar parte de las tensiones ( $T_{\text{corr}}$ ) que se originan, disminuyendo la fisuración.
- c) Resistencia mecánica del hormigón: Posibilita que se incrementen las tensiones de tracción que el material puede soportar.

En la Figura 1.11 se esquematizan los efectos de la corrosión en el hormigón armado.

Cuando el proceso corrosivo continúa, puede ocurrir el desprendimiento de partes del recubrimiento a lo largo de la barra debido al aumento de volumen de los productos originados en la oxidación (Figura 1.12). El desprendimiento del recubrimiento puede ser definido como un estado límite de servicio, a partir del cual debe procederse a la reparación de la estructura ya que se encuentra afectada, no solo la estética de la misma, sino que pueden ocasionarse accidentes por desprendimientos de trozos de hormigón sobre las personas que habitan o circulan por las proximidades de la estructura, en particular, cuando se trata de construcciones en altura [7].

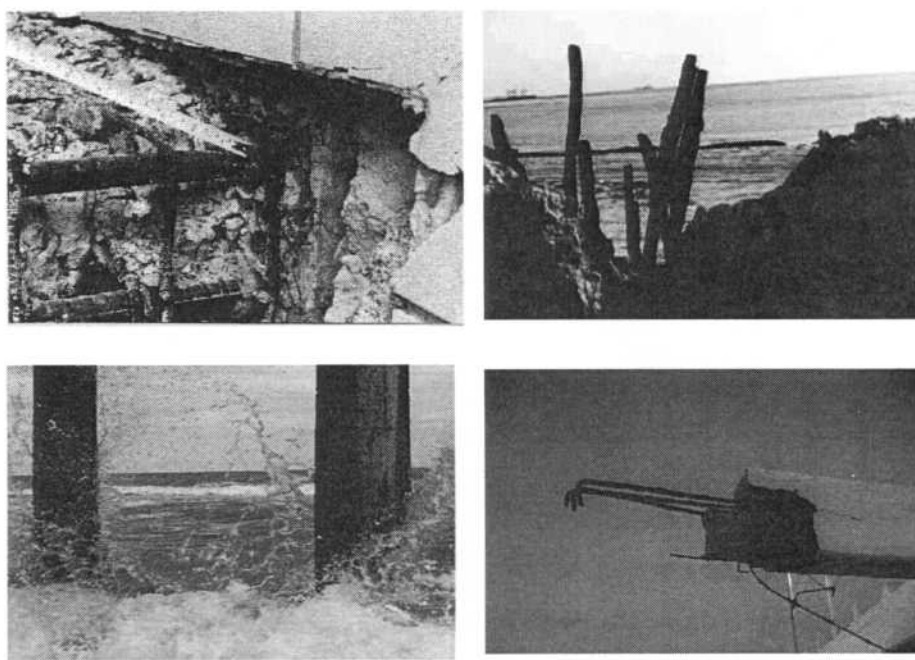


**Figura 1.11:** Efectos de la corrosión en las estructuras de hormigón armado.

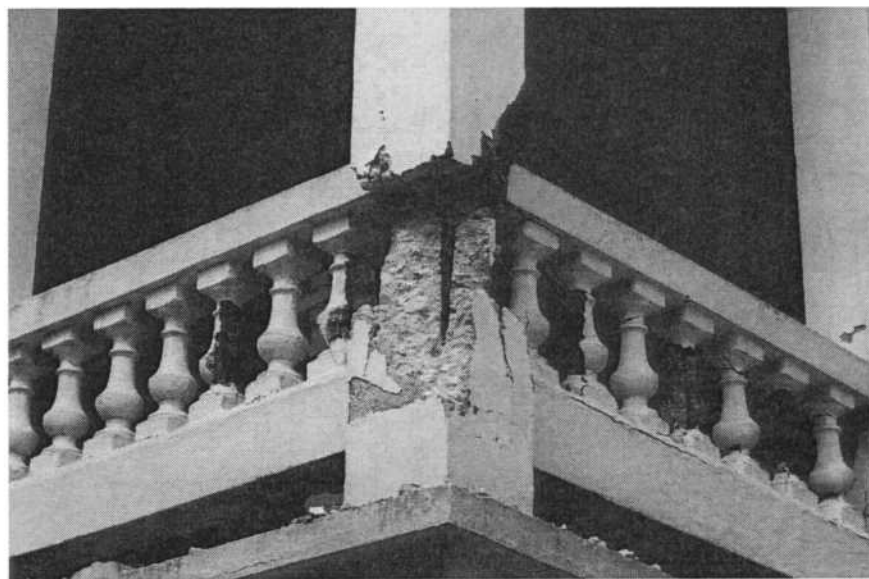
Finalmente, puede producirse el colapso de la estructura que puede ocurrir si la capacidad resistente de los elementos que la integran se reduce lo suficiente debido a la disminución de la sección transversal del acero o del hormigón, o a la pérdida de la adherencia entre las barras y el hormigón.

Sin embargo, debe mencionarse que no se han registrado colapsos de estructuras de hormigón por problemas de corrosión, ya que los síntomas externos son claros y alertan sobre el desarrollo y magnitud del proceso en marcha. Sin embargo, pueden producirse colapsos puntuales en algunos sectores de la estructura, en particular en ambientes extremadamente agresivos (Figura 1.13) [7].

No obstante, cabe mencionar, que la corrosión localizada de la armadura por la existencia de fisuras en el hormigón, por ejemplo de tipo estructural, puede originar colapsos sin previo aviso.



**Figura 1.12:** Ejemplos de estructuras que sufrieron desprendimientos de hormigón [8].

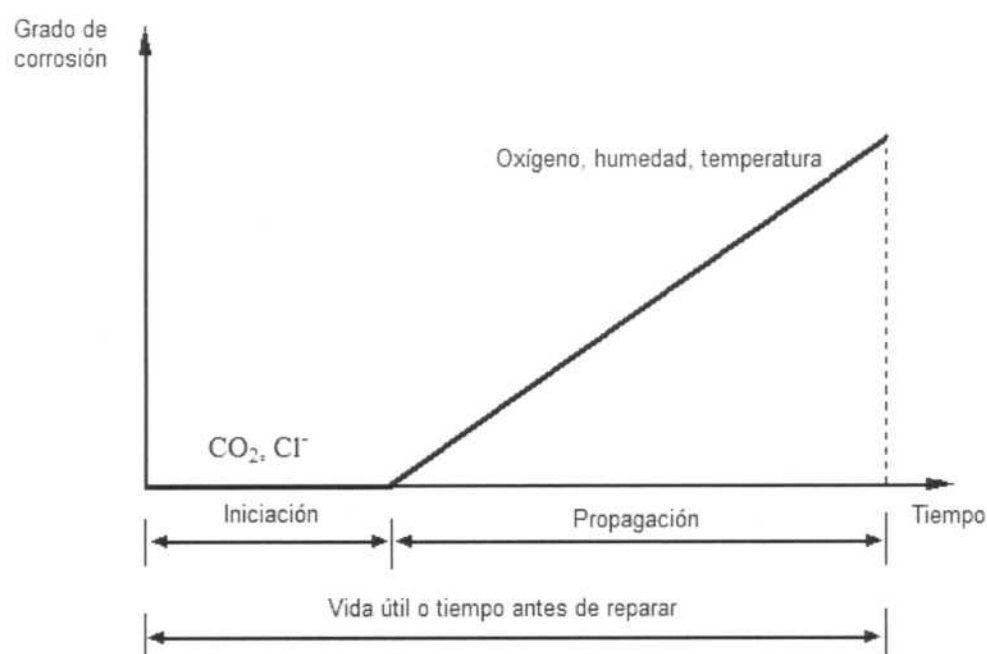


**Figura 1.13:** Vista de armaduras con alto grado de corrosión en una estructura en atmósfera marina [8].

El conocimiento de este fenómeno es de gran interés cuando lo que se quiere es predecir la vida útil de una estructura de hormigón armado. El análisis de estructuras existentes muestra que el tiempo que transcurre entre la iniciación del proceso de corrosión y el descascarado de la estructura puede variar ampliamente. Por ese motivo, es que se requiere un mejor conocimiento del fenómeno de corrosión en las estructuras de hormigón armado, para optimizar su mantenimiento y política de reparaciones [9].

### 1.3 Modelos del proceso corrosivo

Diferentes modelos conceptuales se han desarrollado para describir el proceso de corrosión en las barras de refuerzo. Según Tuutti [10], bajo condiciones naturales, la corrosión del acero en el hormigón implica dos etapas consecutivas que incluyen: “iniciación”, que es cuando los agentes agresivos entran al hormigón sin despasivar el acero; y “propagación”, que es cuando la corrosión comienza, se forman óxidos que se expanden alrededor de la barra de acero, induciendo la rotura del recubrimiento [11]. En la Figura 1.14 se observa un gráfico de lo expuesto.



**Figura 1.14:** Esquema del modelo de Tuutti [10].



Según Cady y Weyers [12], deben considerarse tres etapas consecutivas distintas, que involucran: difusión de los agentes agresivos, corrosión del acero y deterioro del recubrimiento. La primera etapa es la de iniciación descrita por Tuuti; la segunda etapa corresponde a la aparición de productos de corrosión, como daño primario, mientras que la tercera etapa (deterioro) comienza cuando el daño a las estructuras de hormigón armado hace que deba ser reparado. Este último modelo es completado por Francois y Arliguie [13], que toman en cuenta las microfisuras iniciales en el recubrimiento de hormigón, las cuales pueden modificar el período de iniciación.

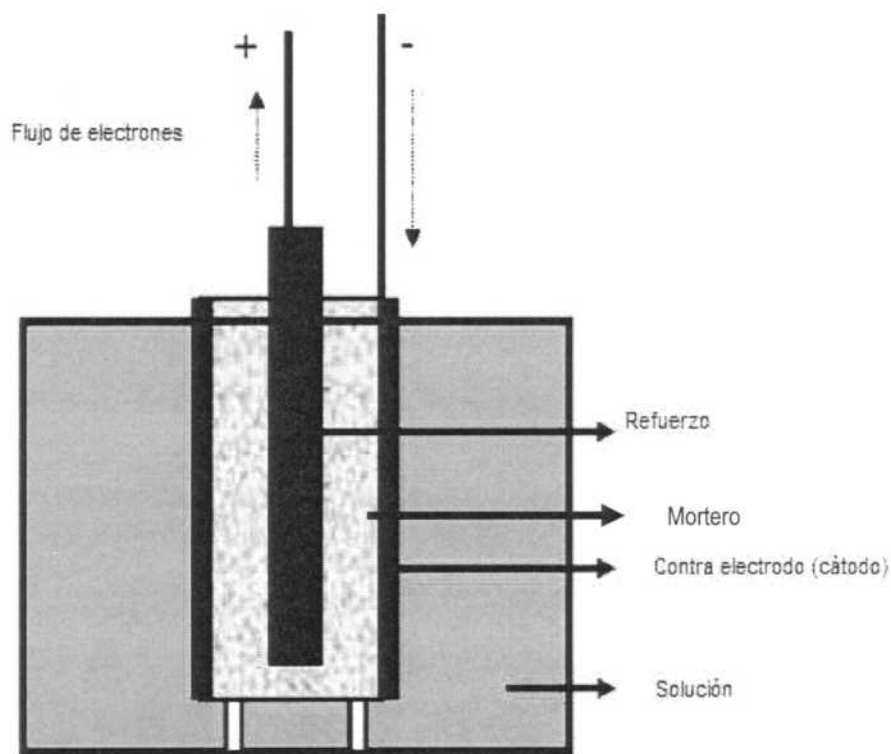
#### **1.4 Ensayos de corrosión acelerada**

En los ensayos de corrosión de armaduras se utilizan tres tipos de técnicas: corrosión natural, corrosión simulada y corrosión acelerada. En la técnica de corrosión natural, las armaduras embebidas en hormigón son expuestas a ambientes agresivos o se emplean armaduras ya corroídas extraídas de elementos deteriorados. Los resultados obtenidos representan mejor los fenómenos de corrosión que se producen en estructuras reales. Sin embargo, no siempre es posible disponer de acceso a armaduras pertenecientes a estructuras deterioradas y, por otro lado, en armaduras expuestas, se necesita mucho tiempo para que la corrosión ejerza una influencia significativa sobre el acero. Por su parte, los ensayos de corrosión simulada consisten en someter a las probetas a soluciones salinas que simulan diferentes condiciones y ambientes. Los resultados de dichos ensayos pueden no corresponder de manera fehaciente con los observados en situaciones reales.

Por lo tanto, en la mayoría de las ocasiones, se utiliza la técnica electroquímica de ensayo de corrosión acelerada. De esta forma se alcanza una cantidad de corrosión significativa en un período de tiempo razonable. En esta técnica, el proceso de corrosión se acelera por polarización eléctrica de la armadura. Se aplica un potencial eléctrico positivo a las barras para forzarlas a que actúen de ánodo y provocar la formación de iones de  $\text{Fe}^{+2}$  (Figura 1.15). La metodología de ensayo galvanostático permite simular una velocidad de corrosión constante, controlando la corriente aplicada y obtener diferentes niveles de corrosión en cortos períodos de tiempo.

Para determinar si la disolución del hierro es la reacción anódica principal se usa la eficacia de corriente, que representa la relación entre la carga necesaria para oxidar el hierro, y la carga total que ha pasado en un determinado tiempo. El valor de la eficacia de corriente se obtiene comparando la pérdida gravimétrica real y el valor teórico dado por la ley de Faraday.

Por todo lo expuesto anteriormente, este método aparece como un procedimiento interesante para evaluar el efecto de la corrosión de los refuerzos sobre el daño al hormigón armado, dado que permite reducir el tiempo de ensayo. Sin embargo, existe la posibilidad de que este método modifique tanto el proceso como el patrón de corrosión debido a la migración de hierro en los poros del hormigón como resultado del campo eléctrico generado en la superficie del acero [9].



**Figura 1.15:** Esquema de un ensayo de corrosión acelerada.

El objetivo final de este tipo de estudios, es obtener información directa de la naturaleza de los productos de corrosión generados para emplear esos datos como *inputs* de los



diversos modelos o programas de cálculo que permiten predecir la vida útil de una estructura de hormigón armado en función del proceso corrosivo que ha sufrido. Sin embargo, no existe un consenso generalizado en cuanto a si una dada densidad de corriente de corrosión aplicada en forma artificial, genera los mismos efectos que dicha densidad de corriente cuando el proceso corrosivo ocurre en forma espontánea.

Puede decirse entonces que, en general, las pruebas de laboratorio poseen algunas desventajas ya que, en algunas ocasiones, este tipo de prueba no simula de manera exacta el ambiente y las condiciones de operación del sistema real. Por otra parte su duración es relativamente corta en comparación con el tiempo de vida para el que se diseñan las estructuras. Esto trae consigo la necesidad de extrapolar los resultados para tener una predicción del comportamiento de los materiales.

### **1.5 Determinación cuantitativa del daño por corrosión**

Las reacciones electroquímicas “producen” o “consumen” electrones, por lo que la velocidad del flujo electrónico desde o hacia la interfase que reacciona, es una medida de la velocidad de reacción. El flujo electrónico es medido frecuentemente como corriente,  $I$ , en Amperios, donde 1 Amperio es igual a 1 coulomb de carga ( $6,2 \times 10^{18}$  electrones) por segundo.

La proporcionalidad entre la velocidad de una reacción electroquímica,  $r$  (en moles/segundo) y la corriente,  $I$  (en Amperios), está dada por la Ley de Faraday (ecuación 1.6):

$$r = \frac{I}{F * n} \quad (1.6)$$

donde  $F$  es la constante de Faraday (96.500 coul/equivalente) y  $n$  es el número de electrones intercambiados en la reacción (equivalentes/mol).



Esta velocidad de reacción, puede ser transformada en velocidad de corrosión ( $w$ ) o de pérdida de peso (en términos de masa disuelta por unidad de área expuesta al electrolito y por unidad de tiempo), multiplicándola por la masa atómica ( $A$ ) del elemento en cuestión (ecuación 1.7):

$$w = \frac{I * A}{n * F} \quad (1.7)$$

### 1.5.1 Técnicas gravimétricas

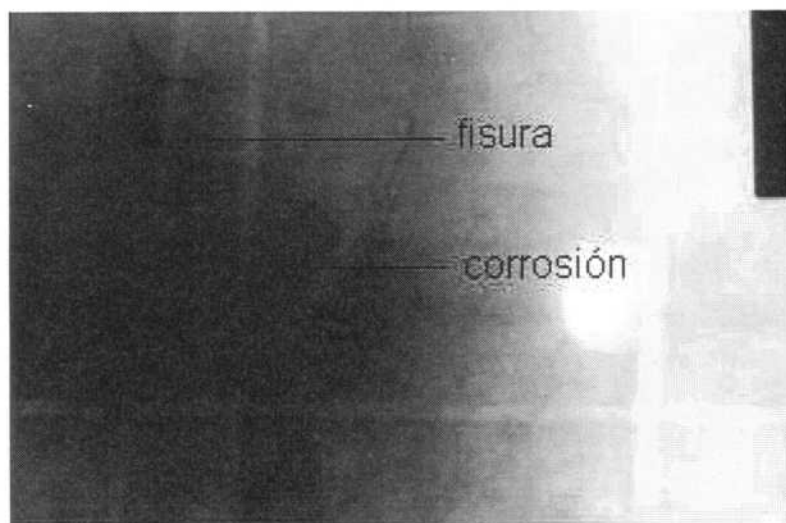
La técnica tradicionalmente usada para evaluar velocidades de corrosión en metales y aleaciones, es la determinación de la pérdida de peso sufrida por el material, en un período determinado de tiempo. Para el caso de la corrosión de barras de acero embebidas en hormigón, la gravimetría presenta las siguientes características [14]:

- a) Como las armaduras están embebidas y no se ven desde el exterior, para cada medida es necesario romper la probeta en estudio. En consecuencia, se necesita un gran número de probetas si se quiere conocer la evolución de la velocidad de corrosión con el tiempo.
- b) Se evalúan velocidades de corrosión medias en el intervalo de tiempo considerado.
- c) Cuando las pérdidas de peso son pequeñas, la manipulación de la probeta para su pesada y eliminación de óxidos, introducen errores en la medida de la pérdida de peso.

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación de los metales.

### 1.5.2 Gammagrafía

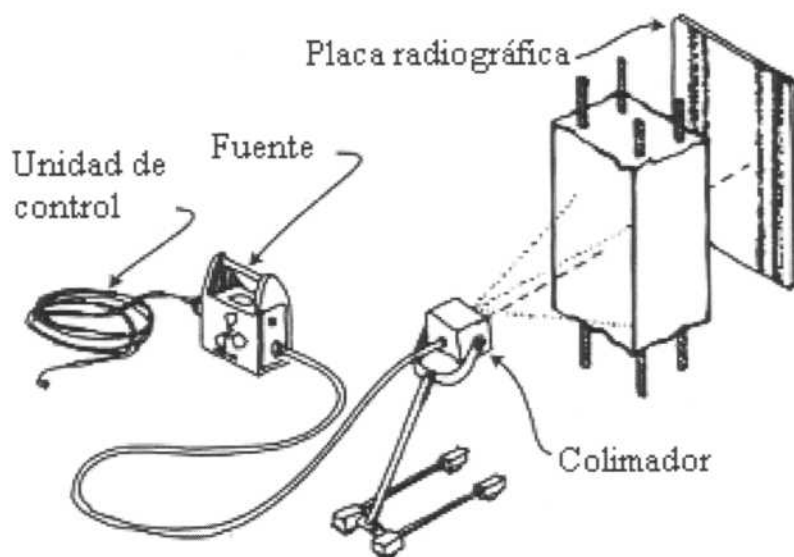
La mayor parte de los edificios, puentes, túneles, muelles y muchos monumentos son contruidos usando estructuras de hormigón armado. La fortaleza de estas estructuras depende de la calidad del hormigón y del número, tamaño, posición y condición de las armaduras, que pueden ser barras de acero o cables de acero tensados [15]. En los últimos años se ha incrementado la necesidad de inspeccionar las estructuras de hormigón armado. Al envejecer, la posible corrosión del hierro puede afectar su seguridad y, generalmente, no se cuenta con documentación precisa al considerar la modificación o “reciclado” de viejas estructuras. Obviamente es preferible usar métodos de inspección no destructivos, pero rara vez son utilizados por considerarse difíciles o imposibles. El principio básico de la gammagrafía consiste en la combinación de imágenes del tipo de los rayos X con técnicas de triangulación para ubicar objetos, comúnmente usadas por agrimensores. En lugar de rayos X, se utiliza radiación más penetrante como los rayos gamma. De esta manera se generan imágenes radiográficas (gammagrafías) para obtener, por ejemplo, dos o más vistas en perspectiva de las barras de acero ocultas en el concreto. Luego se analiza las imágenes con software y finalmente se obtiene la localización de las barras de acero, cuál es su diámetro y si están corroídas (Figura 1.16).



**Figura 1.16:** Gammagrafía de un sector de balcón [15].

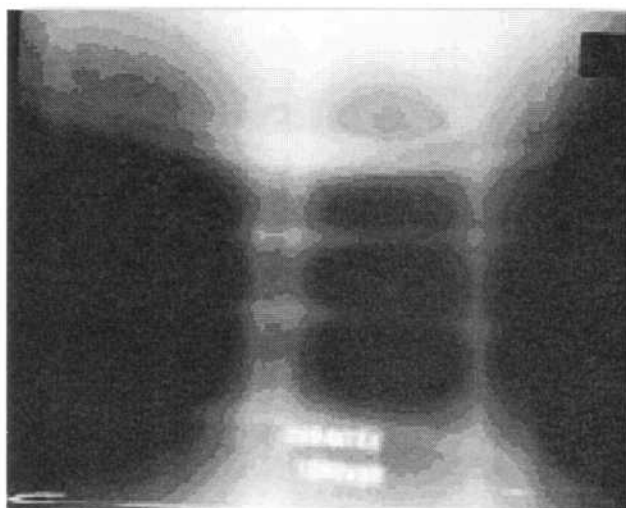
El resultado es de gran confiabilidad y precisión, y la aplicación de esta técnica permite estudiar estructuras antes consideradas inaccesibles. Esta es la única técnica práctica no destructiva disponible para el estudio detallado y preciso de armaduras profundas y/o complejas. Comparada con estudios destructivos, permite realizar inspecciones mucho más exhaustivas, y al mismo tiempo evitar deterioro, suciedad, polvo e interrupciones.

El método consiste en colocar una fuente blindada emisora de rayos gamma de un lado de la estructura a investigar y del otro una placa radiográfica sensible (Figura 1.17). El haz de rayos gamma atraviesa el hormigón, y como los hierros que contiene absorben más radiación que el hormigón, éstos proyectan zonas de menor densidad fotográfica en la placa. La técnica no induce radiactividad en los materiales irradiados. En la aplicación de la misma se observan las medidas de protección radiológica establecidas por la Autoridad Regulatoria Nuclear [15] ya que, al igual que los rayos X, los rayos gamma pueden causar daño a los tejidos vivos con una probabilidad que crece con la intensidad de la irradiación absorbida,

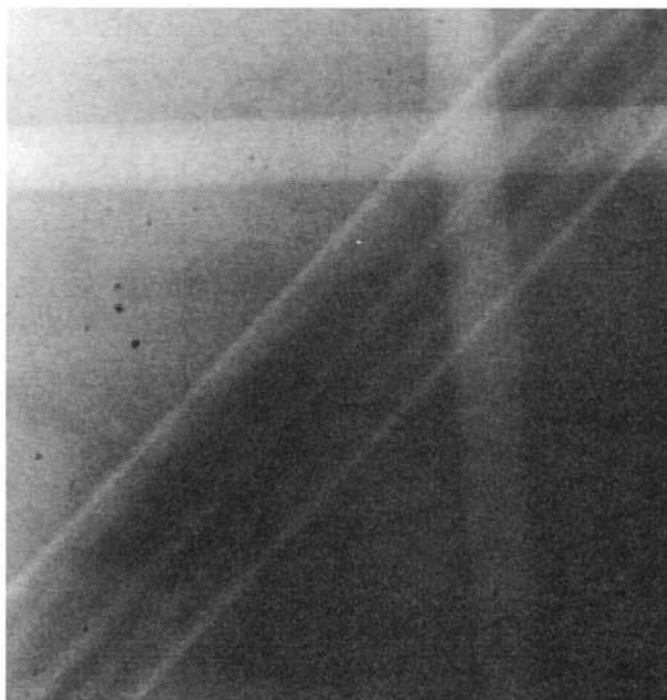


**Figura 1.17:** Representación simplificada de una disposición para la realización de gammagrafías.

En la Figura 1.18 se observa una gammagrafía realizada a una columna octogonal en un establecimiento industrial, mientras que en la Figura 1.19 se observa una gammagrafía realizada a un caño empotrado en una pared que contiene cables para electricidad, mostrando la sensibilidad de la técnica.



**Figura 1.18:** Gammagrafía de una columna octogonal en un establecimiento industrial [15].



**Figura 1.19:** Gammagrafía de un caño con cables internos [15].



Los tiempos de irradiación dependen del espesor de las estructuras a examinar. Piezas de hormigón de hasta 30 centímetros de profundidad pueden ser relevadas con fuentes de Iridio en una decena de minutos. Una vez revelada la placa radiográfica, ésta es analizada por un detector que mide punto a punto la cantidad de luz que la atraviesa. Los datos digitalizados son procesados por medio de un programa matemático que permite obtener reconstrucciones tridimensionales de los objetos estudiados [15].

La condición de técnica no destructiva se traduce en economía de tiempo, materiales, mano de obra, y evita costos de reparación. Cuando se trata de edificios habitados, la limpieza, rapidez y carácter silencioso de estos estudios son ventajas aún más decisivas. Otra ventaja es que los rayos gamma son emitidos por radioisótopos en forma espontánea y, por lo tanto, no requieren fuente externa de energía, como las fuentes de alta tensión, como es el caso de los equipos de rayos X. Además, en general, los equipos de gammagrafía son más portables que los equipos de rayos X y, en consecuencia, son más adecuados para trabajos de campo (en edificios, puentes, etc.). Esta técnica tiene un costo comparable al de otros métodos de control y diagnóstico de estructuras de hormigón armado de uso corriente, pero las ventajas que ofrece son, además de las ya mencionadas, la disminución de accidentes, y la reducción de esfuerzo físico de los operarios [15].

### **1.6 Objetivos del trabajo**

En el presente trabajo, a través de la realización de ensayos de corrosión acelerada efectuados sobre probetas de mortero conteniendo una barra de acero en su interior, se establece la correlación existente entre la densidad de corriente de corrosión aplicada y los daños generados sobre el acero, determinados por medio de la aplicación de técnicas tales como microscopía óptica y electrónica de barrido y determinaciones gravimétricas y micrométricas. Además, se analizarán las probetas corroídas por medio de gammagrafía, técnica no destructiva que hasta el presente no ha sido empleada en forma sistemática en ensayos de laboratorio para estudiar procesos de corrosión del hormigón armado. El objetivo de este trabajo es estudiar las correlaciones entre todas las variables involucradas.



## Referencias:

- [1] J. R. Galvele y G. S. Duffó, “Degradación de Materiales - I Corrosión” (Monografía Tecnológica N° 3) 1a ed. Jorge Baudino Ediciones: Instituto Sábato - Universidad Nacional de San Martín - Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires 2006.
- [2] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri y R. Polder, “Corrosion of steel in concrete: Prevention, Diagnosis, Repair”, Wiley-VCH, Alemania (2004).
- [3] R.M. Carranza, G.S. Duffó y S.B. Farina, “Nada es para siempre: química de la degradación de materiales”. Ministerio de Educación, INET, Buenos Aires (2010).
- [4] V. Gentil, “Corrosao”, 2a ed. Guanabara Dois, Río de Janeiro (1987).
- [5] Q. Thanh Nguyen, Tesis doctoral : “Etudes expérimentale et théorique de l’effet de la corrosion sur la fissuration du béton et le comportement global des structures en béton armé”, Universidad de Paris VI (2006).
- [6] [www.lavozdegalicia.es/galicia/2010/10/10/0003\\_8774478.htm](http://www.lavozdegalicia.es/galicia/2010/10/10/0003_8774478.htm) (Consultado: 30 de Abril de 2012).
- [7] Asociación Argentina de Tecnología del hormigón, “Durabilidad del hormigón estructural”, Memoria de la XIV Reunión Técnica, Asociación Argentina de Tecnología del hormigón, Buenos Aires (2001).
- [8] [www.google.com.ar/search?q=corrosion+de+armaduras+en+estructuras+de+hormigon+armado&hl=es419&prmd=imvnsb&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=xGdkUKDBOoun0AHLi4CoCw&sqi=2&ved=0CAcQAUoAQ&biw=1024&bih=626](http://www.google.com.ar/search?q=corrosion+de+armaduras+en+estructuras+de+hormigon+armado&hl=es419&prmd=imvnsb&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=xGdkUKDBOoun0AHLi4CoCw&sqi=2&ved=0CAcQAUoAQ&biw=1024&bih=626) (Consultado: 30 de Abril de 2012).



- [9] E. A. Arva y G. S. Duffó, “Estudio de los productos de corrosión y tiempo de rotura de morteros en procesos de corrosión acelerados”, Congreso Binacional SAM/CONAMET: Jornadas MEMAT 2005, Mar del Plata, Argentina (2005).
- [10] K. Tuutti, “Corrosion of steel in concrete”, Swedish Cement and Concrete Institute (CIB) 4-82, Stockholm, Suecia (1982).
- [11] S. Caré y A. Raharinaivo, “Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel”, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1598-1612.
- [12] P. D. Cady y R. E. Weyers, “Chloride penetration and the deterioration of concrete bridge decks”, Cements, Concrete and Aggregates 5(2) (1983) 81-87.
- [13] R. Francois y G. Arliguie, “Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members”, Magazine of Concrete Research 51(2) (1999) 143-150.
- [14] P. Garcés Terradillos, M. A. Climent Llorca y E. Zornoza Gómez, “Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado”, Editorial Club Universitario, Alicante (2008).
- [15] Tomografía de Hormigón Armado S.A., [www.thasa.com](http://www.thasa.com) (Consultado: 30 de Abril de 2012).

# CAPÍTULO 2

## MATERIALES Y MÉTODOS



## 2.1 Preparación de probetas:

Para los ensayos de corrosión acelerados se moldearon probetas de mortero cilíndricas de 30 mm y 71 mm de diámetro y de 50 mm de altura. En estas probetas se embebieron segmentos rectos de barra cilíndrica lisa de acero SAE 1040 de 5 mm de diámetro y 50 mm de longitud ubicadas según el eje longitudinal del cilindro, y previamente pesadas al 0,1 mg. A estas barras de acero se les removió la capa de óxido original con papel de carburo de silicio de granulometría 600 y se las desengrasó con acetato de etilo durante 1 hora.

En la tabla 2.1 se detalla la composición química del acero utilizado. La interfase entre el mortero y el aire, al igual que el extremo de la barra embebida en el mortero, fueron recubiertas con cinta de alta adherencia de manera de exponer al mortero una longitud de barra igual a 3 cm, que corresponde a un área de 4,7 cm<sup>2</sup>.

**Tabla 2.1** - Composición química de las barras de acero empleadas en el presente trabajo

| Elemento | % g/g  |
|----------|--------|
| C        | 0,36   |
| Si       | 0,21   |
| Mn       | 0,73   |
| P        | 0,007  |
| S        | 0,013  |
| Cr       | 0,05   |
| Ni       | 0,03   |
| Mo       | < 0,01 |

Para el armado de las probetas se utilizó un mortero premezclado marca Revocal, arena secada en estufa hasta constancia de peso y agua. En la tabla 2.2 se muestra la composición química del cemento utilizado y el contenido de cloruros de la arena.



**Tabla 2.2** – Composición química del cemento utilizado y contenido de cloruros presentes en la arena.

| <b>CEMENTO</b>                                                            | <b>g/100 g</b> |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Residuo Insoluble (RI)                                                    | 3,22           |
| Pérdida por calcinación (PC)                                              | 11,10          |
| Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )                                     | 2,00           |
| Óxido de Magnesio (MgO)                                                   | 1,24           |
| Cloruros (Cl <sup>-</sup> )                                               | 0,06           |
| Sulfuros (S <sup>2-</sup> )                                               | 0,05           |
| Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) (ref. IRAM 1504 - ASTM C114)       | 16,30          |
| Óxido de Calcio (CaO) (ref. IRAM 1591-1)                                  | 56,96          |
| Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (ref. IRAM 1591-1)    | 4,26           |
| Óxido de Hierro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(ref. IRAM 1591-1) | 4,02           |
| Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)(ref. ASTM C114)                        | 0,10           |
| Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O) (ref. ASTM C114)                      | 0,69           |
| Alcalinos totales (Na <sub>2</sub> O + 0,658K <sub>2</sub> O)             | 0,55           |
| <b>ARENA</b>                                                              | <b>g/100 g</b> |
| Cloruros (Cl <sup>-</sup> )                                               | 0,08           |

A efectos de estudiar la influencia de la relación agua/cemento utilizada, se utilizaron dos relaciones: 0,5 y 0,6, mientras que la relación arena/cemento fue igual a 3 en ambos casos. Para el proceso de fabricación del mortero se cumplieron las especificaciones de la norma ASTM C 305-11 [1]. Este proceso consta de los siguientes pasos:

- Se coloca el agua necesaria en el recipiente de una mezcladora de mortero.
- Se agrega el cemento mezclando a baja velocidad (62 rpm) durante 30 segundos.
- Se agrega la arena lentamente durante 30 segundos mientras se continúa mezclando a baja velocidad.

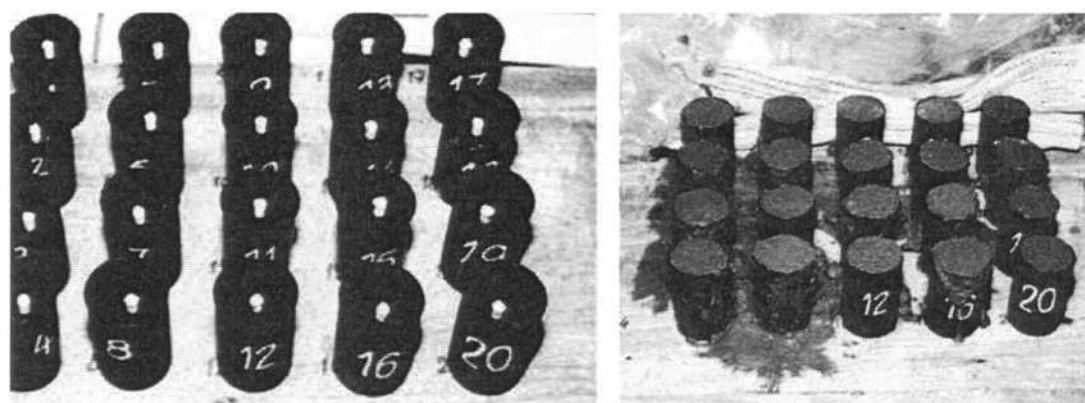
- d) Se detiene el mezclado, se cambia a media velocidad (125 rpm) y se continúa mezclando por otros 30 segundos.
- e) Se detiene la mezcladora y se deja reposar la pasta de mortero por 1,5 minutos. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo, se debe incorporar rápidamente cualquier porción de mezcla que haya quedado en las paredes del recipiente. Luego, durante el resto del tiempo, se cubre el recipiente con una tapa.
- f) Se finaliza mezclando por 1 minuto más a velocidad media.

En la figura 2.1 se muestra una fotografía de la mezcladora utilizada.



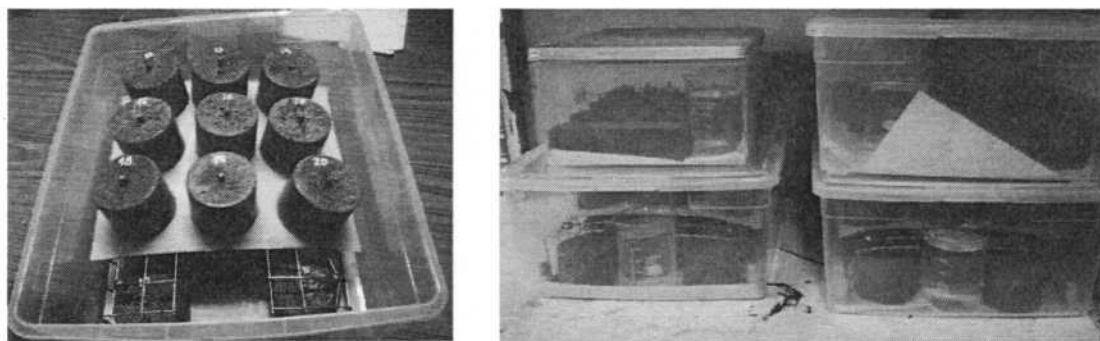
**Figura 2.1:** Fotografía de la mezcladora de mortero utilizada.

Una vez obtenido el mortero, éste se colocó en los moldes, previamente pincelados con silicona F.200/50 para facilitar su desmolde, y que contenían las barras de acero en su interior adecuadamente montadas sobre un soporte de madera. Una vez llenos los moldes, se golpeó 10 veces el soporte de madera de manera de compactar el mortero. En la figura 2.2 se observan fotografías del proceso anterior.



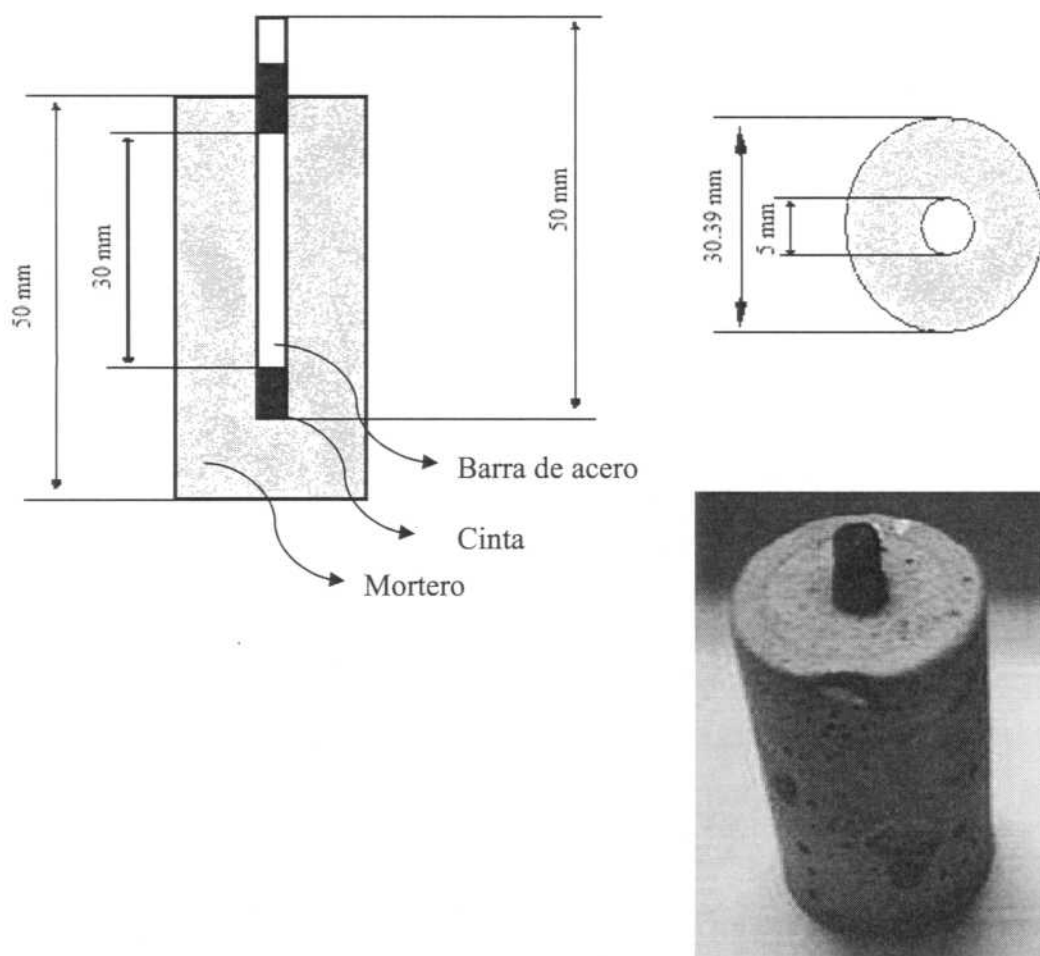
**Figura 2.2:** Izquierda, barras de acero colocadas en sus moldes sobre el soporte de madera. Derecha, moldes con el mortero ya colado.

Una vez moldeadas las probetas, éstas fueron curadas durante 24 horas envueltas en papel film para evitar la evaporación del agua. Pasado ese tiempo, las probetas se desmoldaron y se continuó con el proceso de curado durante 28 días en un recipiente cerrado herméticamente y que contenía un vaso con solución saturada de  $K_2SO_4$  que asegura una humedad relativa del 98% durante el período de curado. En la figura 2.3 se observa a las probetas en sus recipientes de curado.

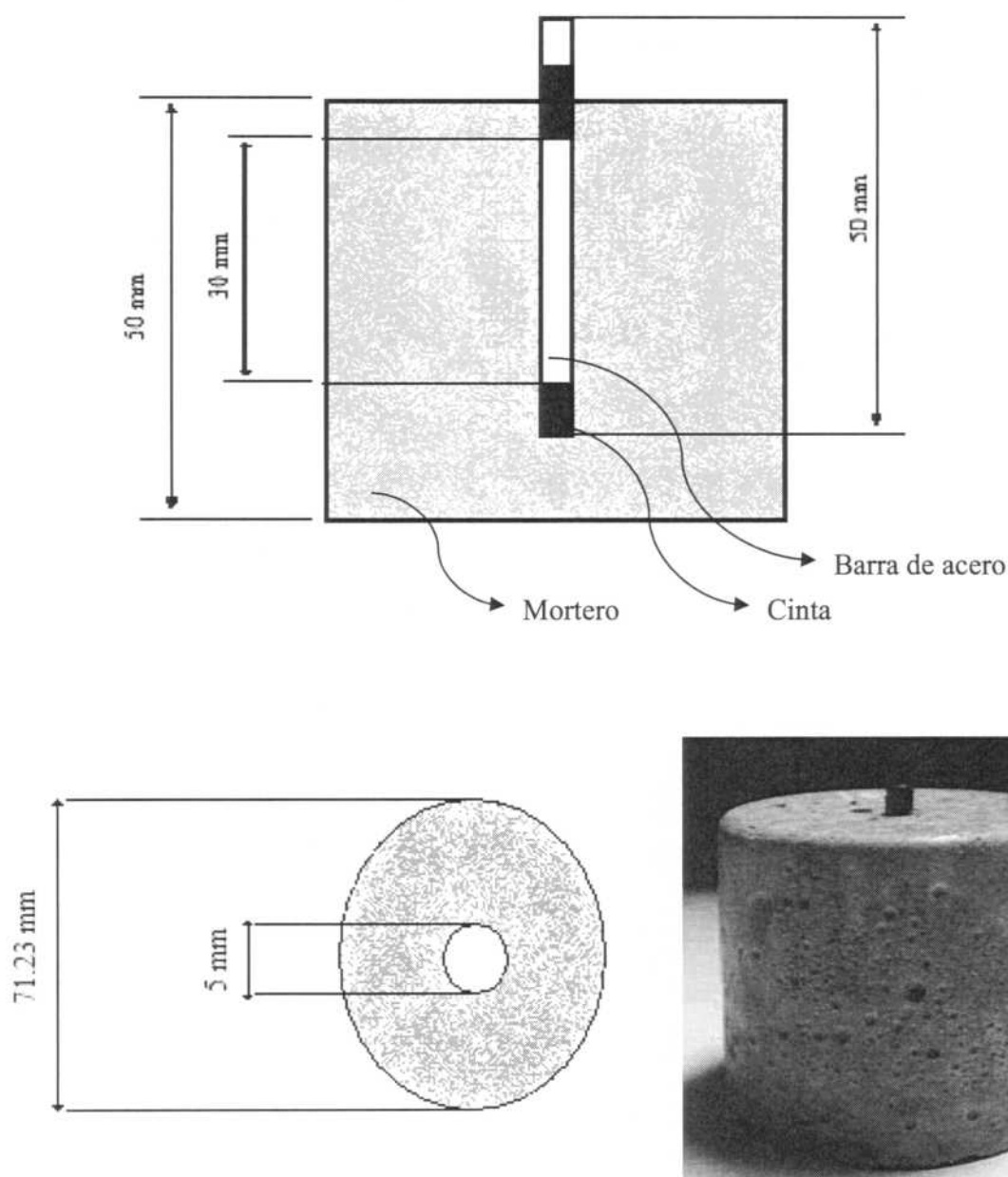


**Figura 2.3:** Probetas en sus recipientes de curado.

En la figura 2.4 se observa un esquema con las dimensiones de la probeta de menor diámetro y una fotografía de la misma, mientras que en la figura 2.5 se observa un esquema con las dimensiones de la probeta de mayor diámetro y una fotografía de la misma.

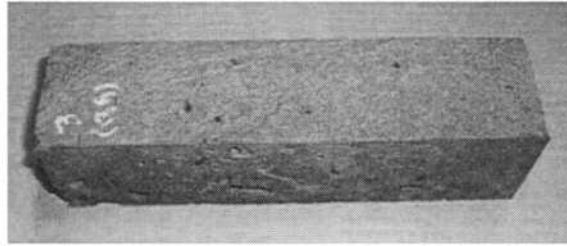


**Figura 2.4:** Esquema de las dimensiones y fotografía de una probeta de 30,4 mm de diámetro.



**Figura 2.5:** Esquema de las dimensiones y fotografía de una probeta de 71,2 mm de diámetro.

Para la determinación de las propiedades mecánicas del mortero utilizado, se construyeron probetas estandarizadas, de dimensiones 16 cm x 4 cm x 4 cm, que fueron sometidas al mismo proceso de curado que las probetas cilíndricas. En la figura 2.6 se muestra una fotografía de estas probetas.



**Figura 2.6:** Patrón utilizado para determinar las propiedades mecánicas del mortero.

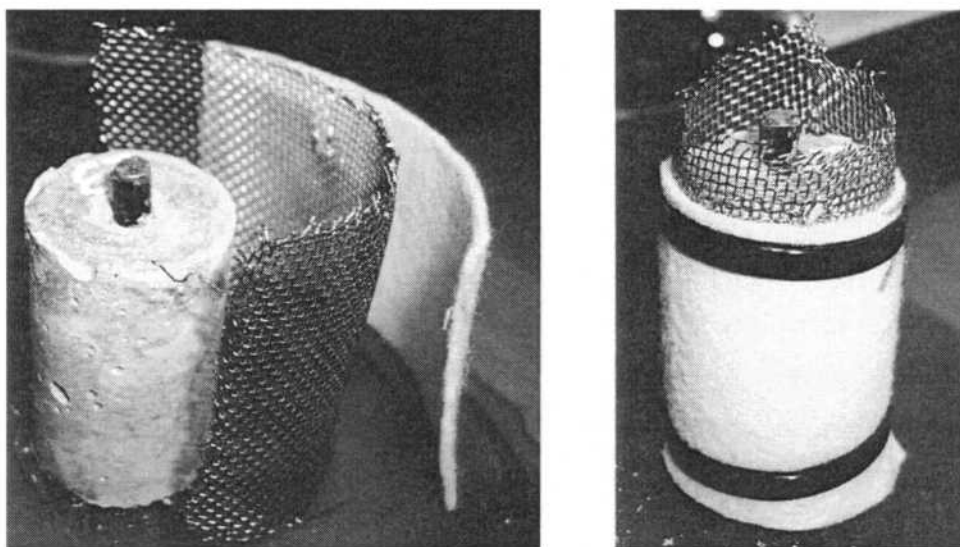
Sobre estas probetas, se realizaron ensayos de flexión y compresión, los resultados se muestran en la tabla 2.3. Como se puede observar, el módulo de flexión promedio y la resistencia a la compresión promedio para las probetas de relación agua/cemento 0,5 son 4,04 MPa y 31,6 MPa, respectivamente, mientras que para las probetas de relación agua/cemento 0,6 el módulo de flexión promedio es 3,5 MPa y la resistencia a la compresión promedio es 23,5 MPa.

**Tabla 2.3 - Resultados de ensayo de flexión y compresión.**

| Probeta<br>Nº | Relación<br>agua/cemento | Módulo de<br>flexión (MPa) | Resistencias a la<br>compresión (MPa) |          |
|---------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------|
|               |                          |                            | Individual                            | Promedio |
| 1             | 0,5                      | 3,80                       | 33,1                                  | 32,5     |
|               |                          |                            | 31,9                                  |          |
| 2             | 0,5                      | 4,41                       | 29,4                                  | 30,3     |
|               |                          |                            | 31,3                                  |          |
| 3             | 0,5                      | 3,92                       | 32,8                                  | 32,2     |
|               |                          |                            | 31,6                                  |          |
| 1'            | 0,6                      | 4,29                       | 27,0                                  | 26,0     |
|               |                          |                            | 25,1                                  |          |
| 3'            | 0,6                      | 2,70                       | 19,6                                  | 21,1     |
|               |                          |                            | 22,7                                  |          |

## **2.2 Ensayos de corrosión acelerada:**

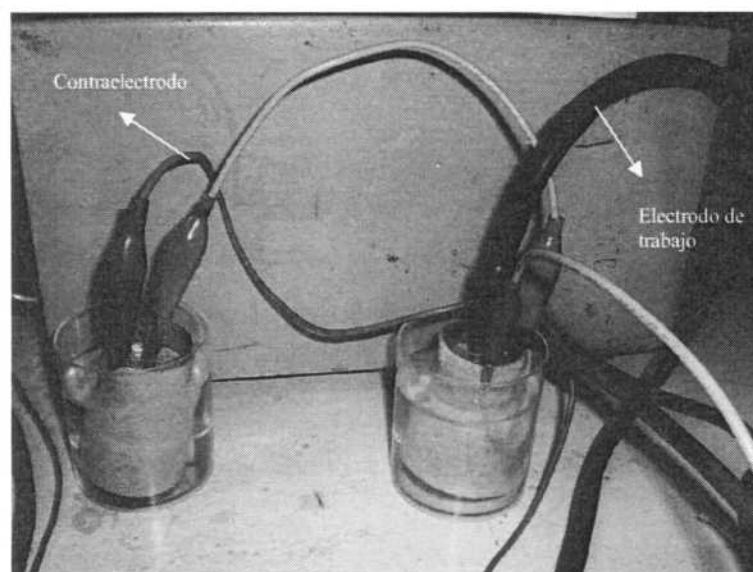
Para realizar los ensayos, donde las barras de acero actuarían como ánodos, cada probeta fue rodeada de una malla de acero inoxidable AISI 304, que actuaría como cátodo. Para lograr una humectación adecuada del mortero con el electrolito utilizado, que en este caso fue agua, se rodeó completamente a la malla de acero inoxidable con un rectángulo de paño absorbente, sosteniéndolos solidariamente a la probeta de mortero mediante precintos plásticos. En la figura 2.7 se muestra el proceso anterior en fotografías.



**Figura 2.7:** Izquierda, malla de acero inoxidable y paño absorbente con los que se envolvieron las probetas. Derecha, probetas listas para ensayar.

Previo a los ensayos, cada probeta fue introducida en un recipiente plástico que contenía agua hasta una altura de 40 mm, durante tres días, para asegurar la adecuada humectación del mortero a través del paño absorbente por capilaridad. Los ensayos fueron llevados a cabo por duplicado con el fin de determinar la reproducibilidad de los resultados. A efectos de ensayar dos probetas simultáneamente para una misma condición, éstas se disponían en serie, de manera que el cátodo de una de ellas (malla de acero inoxidable) se conectaba al ánodo de la siguiente (barra de acero). En la figura 2.8 se observa una fotografía de la conexión en serie de las probetas.

Para corroer artificialmente las barras de refuerzo mediante la aplicación de corriente impresa se utilizaron los siguientes potencióstatos-galvanostatos, operados en modo galvanostático: LYP modelo M7, LYP modelo M5 y EG&G PAR modelo 173. Las densidades de corriente utilizadas fueron de  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ ;  $100 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ ;  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ ;  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y la duración de los ensayos estuvo comprendida entre 98 horas y 15 días. Luego de finalizado el período de ensayo, las probetas fueron extraídas de los recipientes que las contenían, secadas con aire caliente y conservadas en un frasco desecador hasta el momento de realizar los estudios posteriores.



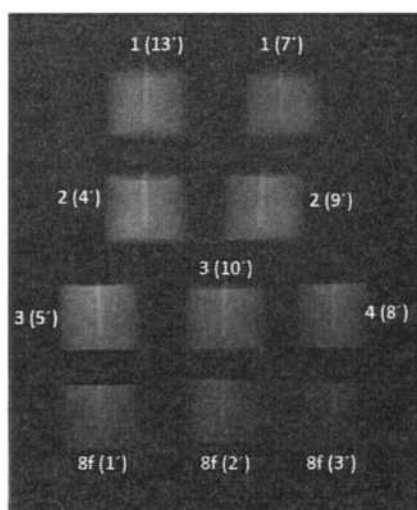
**Figura 2.8:** Esquema y fotografía de la conexión en serie de las probetas.

A efectos de caracterizar electroquímicamente al sistema en estudio, se trazaron las curvas de polarización de cada uno de los distintos tipos de probetas (relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6; y diámetros 30 y 71 mm) utilizando un equipo Gamry ACMEII 843. Para ello se humectaron las probetas como se explicó anteriormente, y se sumergió en el mismo recipiente que contenía agua, un electrodo de referencia de calomel saturado. Para el trazado de las curvas de polarización, que se realizaron en forma galvanostática, se aplicaron pulsos de corriente esperando 5 minutos a que el potencial se estabilice, antes de

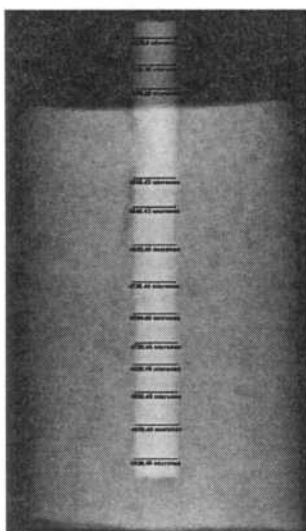
aplicar un pulso de corriente mayor. Las densidades de corriente aplicadas estuvieron comprendidas entre 0,2 y 750  $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

### 2.3 Análisis por gammagrafía

Luego de efectuado el ensayo de corrosión acelerada, las probetas fueron sometidas a su gammagrafiado. Para ello, se ubicaron las probetas sobre un soporte y se colocó de un lado una fuente blindada de  $^{137}\text{Cs}$  de 150 mCi, emisora de rayos gamma, y del otro, una placa radiográfica sensible. El haz de rayos gamma atraviesa el mortero, y como los hierros que contiene absorben más radiación que el mortero, éstos proyectan zonas de menor densidad fotográfica en la placa [2]. En la figura 2.9 se muestra una de las placas obtenidas. A continuación se digitalizó esta placa de manera de poder determinar la pérdida de diámetro de las barras por medio de un *software* de procesamiento de imágenes denominado ImageJ. Para ello, se calibró la imagen de cada probeta a partir de la longitud de sus barras, obteniéndose una resolución de 46  $\mu\text{m}$  por pixel y, posteriormente se tomaron medidas del diámetro a lo largo de toda la barra. En la figura 2.10 se muestran las mediciones realizadas sobre una de las probetas. Debido a que el error con el que se mide el diámetro a lo largo de la barra es de 1 pixel de cada lado, surge que el límite de detección de esta técnica es de aproximadamente 92  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.9:** Gammagrafía obtenida para las probetas de 71 mm de diámetro y relación agua/cemento 0,6.



**Figura 2.10:** Medición del diámetro de la barra utilizando el software de procesamiento de imágenes ImageJ.

#### **2.4 Análisis por gravimetría**

Luego de sometidas las probetas al análisis por gammagrafía, se rompió el mortero de manera de extraerles la barra de acero que tenían en su interior. A estas barras, se las sometió a un proceso de decapado químico para eliminarle los productos de corrosión y determinar la pérdida de peso. En los casos en que las barras tenían productos de corrosión masivos, primeramente se los extrajo por medio de un raspado para disponer de material para efectuarle análisis posteriores.

Para el decapado se siguieron las especificaciones de la norma ASTM G1-03 [3] utilizando la solución designada por C.3.1 del anexo A1 de la mencionada norma y cuya composición se da en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** - Solución de decapado utilizada

| Solución                            | Tiempo         | Temperatura |
|-------------------------------------|----------------|-------------|
| 1000 ml HCl (HCl, sp gr 1.19)       | 1 a 25 minutos | 20 a 25 °C  |
| 20 g Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                |             |
| 50 g SnCl <sub>2</sub>              |                |             |

El proceso de decapado consta de los siguientes pasos:

- Se sumerge una de las barras en la solución anterior durante 2 minutos.
- Se la saca de la solución, se la enjuaga con agua y se la seca.
- Se pesa la barra en una balanza analítica al 0,1 mg.
- Se repite el procedimiento hasta que la diferencia medida entre 2 pesadas consecutivas sea constante y menor que 0,5 mg.
- La pérdida de peso se calcula restando al peso inicial de la barra el último valor de peso medido, de acuerdo a lo explicado en d).

Con el valor de la pérdida de peso por unidad de área y de tiempo,  $w$ , y aplicando la Ley de Faraday (ecuación 1.6), se calculó la densidad de corriente efectiva que llevó a esa pérdida de peso (ecuación 2.1).

$$i_{ef} = \frac{w * n * F}{A} \quad (2.1)$$

Luego la eficiencia del proceso corrosivo ( $Ef$ ), queda definida entonces como (ecuación 2.2):

$$Ef = \frac{i_{ef}}{i_{apl}} * 100 \quad (2.2)$$

donde,  $i_{apl}$  es la densidad de corriente aplicada durante el proceso corrosivo.



Por otro lado, a partir de  $w$  y del tiempo de duración del ensayo, es posible calcular la pérdida de diámetro generada por el proceso de corrosión,  $\Delta\Phi_w$ , asumiendo que se trata de un fenómeno de corrosión generalizada.

## **2.5 Otros estudios realizados**

Con el objeto de caracterizar la morfología del ataque y el tipo de productos de corrosión formados, tanto las barras (pre y post decapado) como los productos de corrosión desprendidos de las mismas tal como se detalló en 2.2, fueron sometidas a otros estudios tales como microscopía electrónica de barrido, espectroscopía Raman y espectroscopía Mossbauer. A continuación se describen sucintamente los detalles de cada una de estas técnicas como así también el tipo de muestra que se utilizó en cada una de ellas.

### **2.5.1 Espectroscopía Raman**

La espectroscopía Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona en pocos segundos información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico y/o inorgánico permitiendo así su identificación. El análisis mediante espectroscopía Raman se basa en el examen de la luz dispersada por un material al incidir sobre él un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de la luz es dispersada inelásticamente experimentando ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independiente de la frecuencia de la luz incidente. Se trata de una técnica de análisis que se realiza directamente sobre el material a analizar sin necesitar éste de ningún tipo de preparación especial y que no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza el análisis, es decir, es no destructiva [4,5].

Para el análisis de los productos de corrosión formados con Espectroscopía Raman se incluyó la barra de acero de una probeta de relación agua/cemento 0,6, sometida a  $750 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , con sus productos de corrosión en resina acrílica en un molde cilíndrico y luego de cortó un disco de 1 cm de altura en la región media de la barra. Una cara de este disco fue posteriormente pulida con papel de carburo de silico, completando dicho proceso con pasta

de diamante de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro. Esa fue la cara que se observó con el equipo, que se trataba de un sistema LabRAM HR Raman (Horiba Jobin Yvon), equipado con doble monocromador y detector CCD (*charge coupled device*) de resolución espectral de 1.5  $\text{cm}^{-1}$ . Se utilizó la línea 514.5 nm de un láser de argón como fuente excitadora y la potencia del laser sobre la muestra se mantuvo por debajo de 0.5 mW de modo de evitar el calentamiento del punto a observar. El microscopio acoplado al espectrómetro (objetivos de x10, x50, x100) permite concentrar el haz en una región de estudio aproximadamente circular de 100  $\text{mm}^2$ . El tiempo de adquisición y el número de espectros promediados fue ajustado en cada punto siendo en general del orden de 30 s de adquisición y 2 promedios para cada espectro.

### 2.5.2 Espectroscopía Mossbauer

Esta técnica se basa en la emisión y la absorción resonante de rayos gamma en sólidos. Para ello, la fuente de rayos gamma se monta sobre una plataforma móvil, cerca de la muestra, mientras que un detector mide los rayos gamma dispersados por la muestra. La fuente se mueve lentamente hacia la muestra a velocidad variable, para cambiar continuamente la frecuencia de la radiación emitida. Un descenso intenso en la señal del detector a una velocidad determinada (es decir, a una cierta frecuencia) indica absorción de resonancia por parte de los núcleos de la muestra. Debido a la alta energía y a las estrechas líneas de los rayos gamma, es una de las técnicas más sensibles en términos de resolución de energía. Esta técnica, además de permitir la identificación de compuestos, proporciona información acerca de los enlaces y la estructura de los mismos [6,7].

Para el análisis de los productos de corrosión formados con Espectroscopía Mossbauer se utilizó una muestra del polvo recolectado antes del proceso de decapado. Las mediciones Mossbauer se llevaron a cabo en un espectrómetro convencional en geometría de transmisión con aceleración constante, utilizando una fuente de  $^{57}\text{Co}$  en matriz de Rh. Los barridos fueron hechos en el rango de velocidades entre -10 y 10 mm/s a temperatura ambiente (RT). El ajuste del espectro obtenido se realizó con el programa Normos [7]. Los



valores de corrimiento isomérico (CI) están referidos al del Fe metálico. El desdoblamiento cuadrupolar se denota DC.



**Referencias:**

- [1] ASTM C 305-99, "Standar Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency" (1999).
- [2] Tomografía de Hormigón Armado S.A., [www.thasa.com](http://www.thasa.com) (Consultado: 30 de Abril de 2012).
- [3] ASTM G 1-03, "Standar Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens" (2003.)
- [4] D.J. Pasto y C.R. Johnson, "Determinación de estructuras orgánicas", Editorial Reverté S.A. España (2003).
- [5] D.A. Skoog, F.J. Holler y S.R. Crouch, "Principios de análisis instrumental", 6ta edición, Cengage Learning Editores S. A., México (2007).
- [6] W.F. Pickering, "Química Analítica Moderna", Marcel Dekker Inc., Nueva York (1980).
- [7] C.P. Poole y H.A. Farach, "Teoría de la resonancia magnética", Wiley-Interscience, Nueva York (1976).

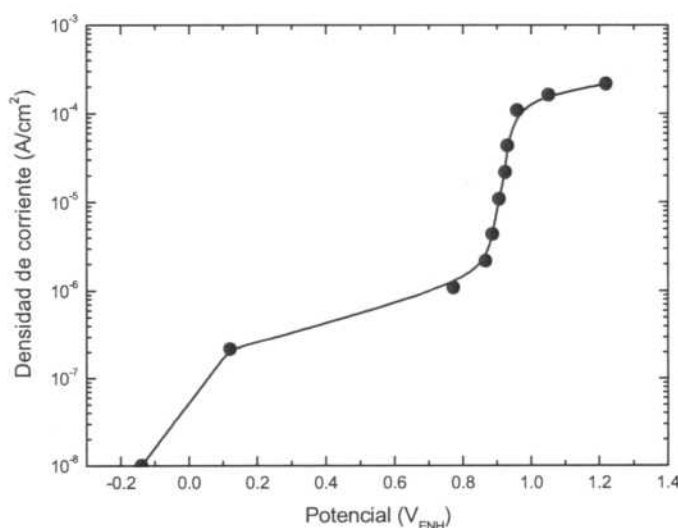
# CAPÍTULO 3

## RESULTADOS

En el presente capítulo se describirán los resultados experimentales en el orden en que fueron efectuadas las experiencias: curvas de polarización, ensayos de corrosión acelerada, gammagrafías, ensayos gravimétricos y análisis de los productos de corrosión.

### 3.1. Curvas de polarización

En la figura 3.1 se muestra, a modo de ejemplo, la curva de polarización de la barra de acero embebida en un mortero de relación a/c 0,6 y de 30 mm de diámetro. Esta probeta fue sumergida en agua durante 72 hs, previo al trazado de la curva. Debido a la baja conductividad del electrolito, primeramente se determinó la resistencia eléctrica entre la probeta y el electrodo de referencia, por medio de un ensayo de espectroscopía de impedancia electroquímica a frecuencias entre 100 kHz y 1 kHz. La resistencia obtenida fue de 1800 ohm, y dicho valor fue empleado para efectuar las correspondientes correcciones por caída óhmica.



**Figura 3.1:** Curva de polarización obtenida para una probeta de relación agua/cemento 0,6 y 30 mm de diámetro.

En la figura 3.1 se puede apreciar que a potenciales superiores al de corrosión ( $E_{\text{corr}} = -0,140 \text{ V}_{\text{ENH}}$ ), se obtiene una zona pasiva con densidades de corriente del orden de  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  y que a potenciales mayores que aproximadamente  $0,8 \text{ V}_{\text{ENH}}$ , la densidad de



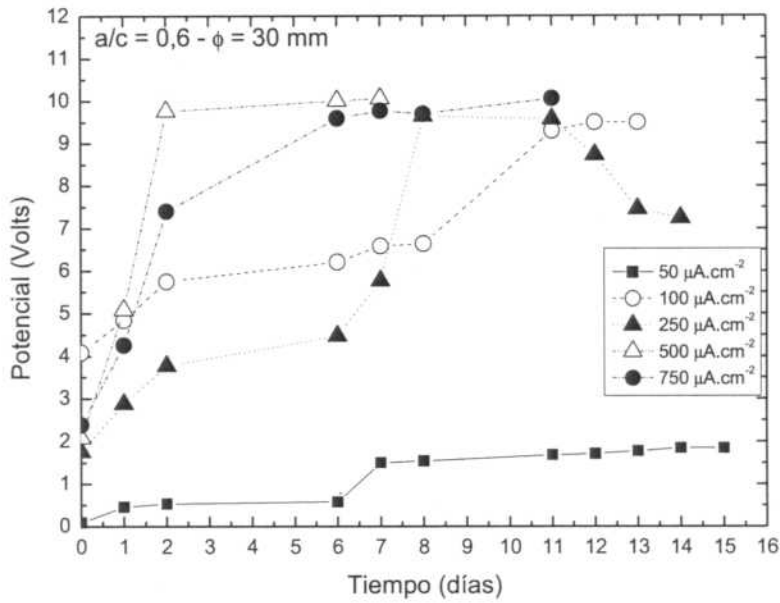
corriente crece abruptamente, probablemente asociada a un proceso de corrosión localizada y al desprendimiento de oxígeno. Un comportamiento similar se obtuvo para ambas relaciones a/c y para los dos diámetros de probetas ensayados (30 y 71 mm).

### **3.2 Ensayos de corrosión acelerada:**

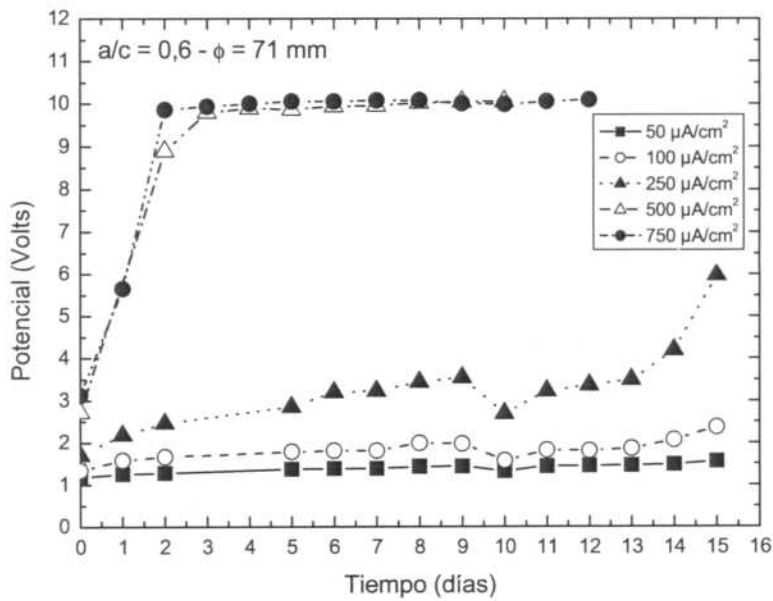
La descripción de los resultados de corrosión acelerada, se llevará a cabo según la relación agua/cemento (a/c) empleada: 0,6 y 0,5.

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran la evolución del potencial en función del tiempo, para las diversas densidades de corriente utilizadas al corroer en forma acelerada las probetas fabricadas con una relación a/c: 0,6 y con diámetros de 30 y 71 mm, respectivamente.

Se puede apreciar en ambos casos que, para bajas densidades de corriente, el potencial es constante con el tiempo o muestra un leve incremento; mientras que para altos valores de densidad de corriente, el potencial aumenta abruptamente durante el período inicial, para luego estabilizarse. En algunos casos, luego de un cierto tiempo, se observa un decrecimiento del potencial, probablemente debido al inicio de la fisuración de las probetas ensayadas, que hace que el agua ingrese por las fisuras, disminuyendo la resistividad eléctrica del sistema. En los casos de aparición de fisuras macroscópicas, que podrían generar una destrucción masiva de las probetas, los ensayos se detuvieron previo a los 15 días previstos originalmente.

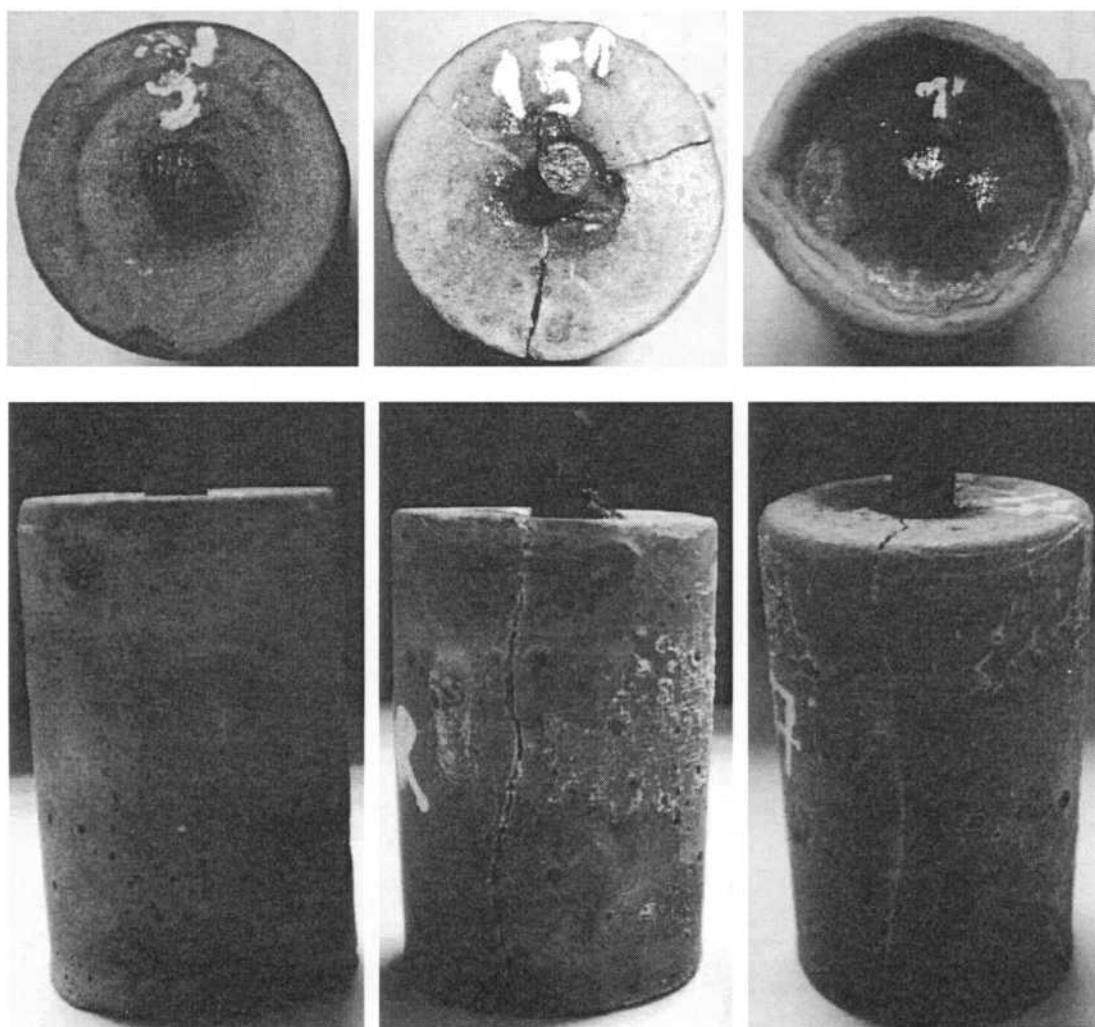


**Figura 3.2:** Evolución del potencial con el tiempo para las probetas de relación a/c: 0,6 y 30 mm de diámetro.

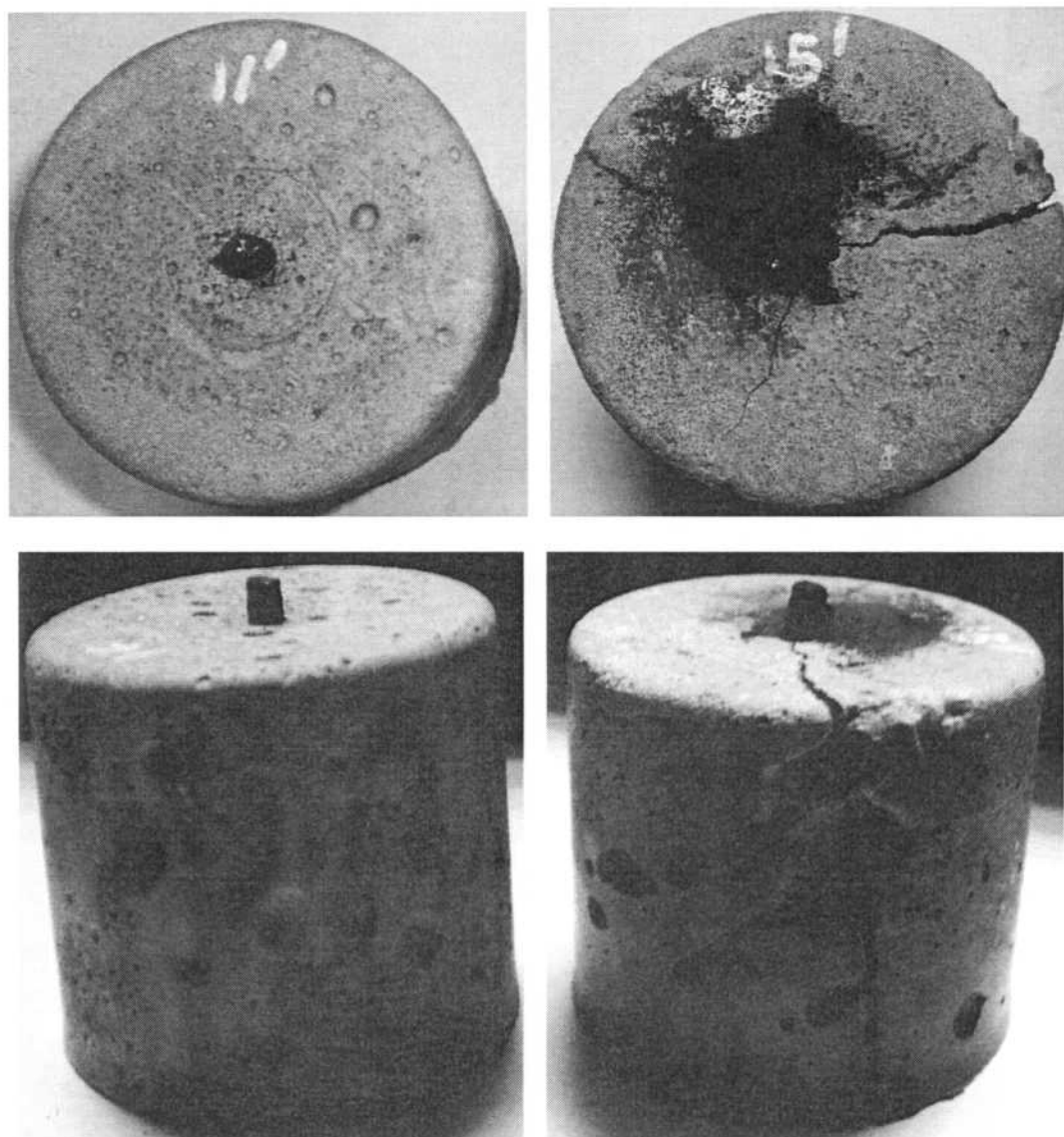


**Figura 3.3:** Evolución del potencial con el tiempo para las probetas de relación a/c: 0,6 y 71 mm de diámetro.

Una vez finalizado el período de ensayo se observó que las probetas de menor diámetro sometidas a  $250 \mu\text{A.cm}^{-2}$ ,  $500 \mu\text{A.cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$  presentaban fisuras en el recubrimiento de mortero, mientras que para las probetas de mayor diámetro solo las sometidas a  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$  estaban fisuradas. Las fisuras presentaban dirección radial en la cara superior de las probetas, y longitudinal paralela a la barra de refuerzo en la superficie lateral de las mismas. En algunos casos también se pudo observar la presencia de productos de corrosión en la interfase mortero/aire de las probetas. En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran fotografías de algunas de las probetas luego de concluido el período de ensayo.



**Figura 3.4:** Aspecto de las probetas de 30 mm de diámetro y a/c 0,6 luego de finalizado el período de ensayo a  $100 \mu\text{A.cm}^{-2}$ ,  $250 \mu\text{A.cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (de izquierda a derecha).

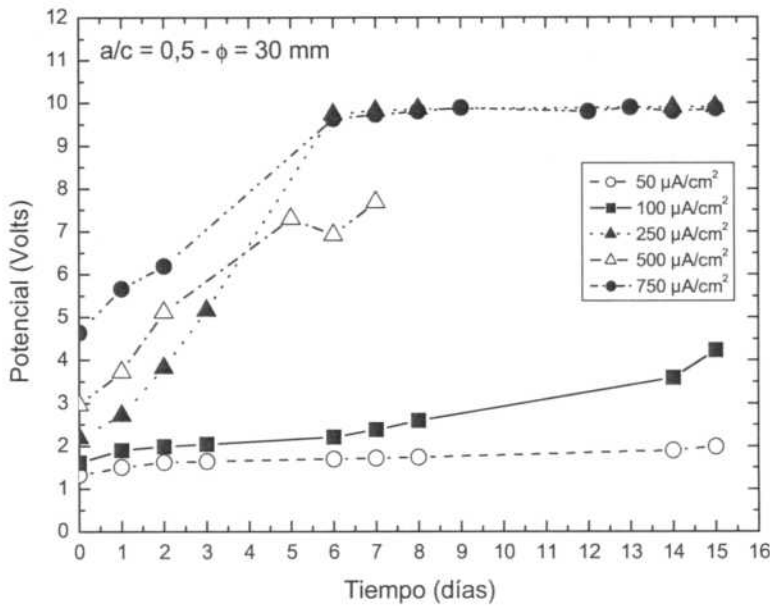


**Figura 3.5:** Aspecto de las probetas de 71 mm de diámetro y a/c 0,6 luego de finalizado el período de ensayo a  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (de izquierda a derecha).

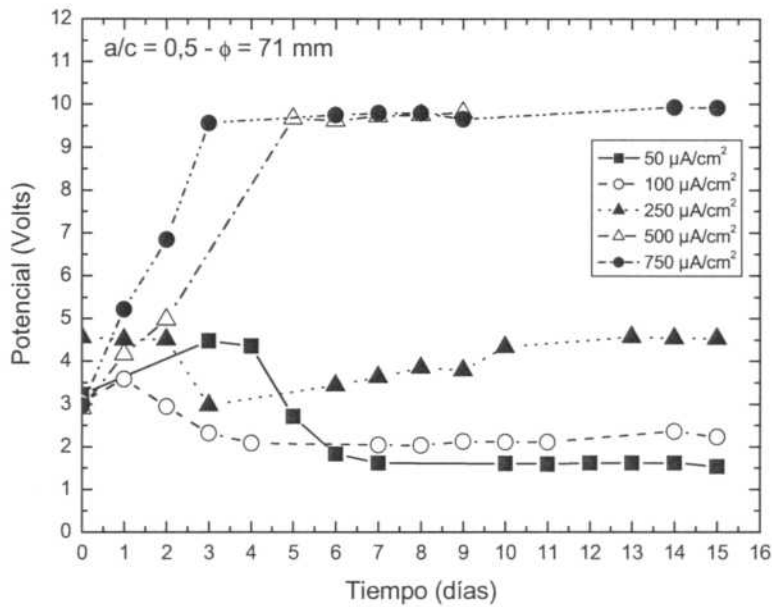
Las figuras 3.6 y 3.7 muestran la evolución del potencial en función del tiempo, para las diversas densidades de corriente utilizadas al corroer en forma acelerada las probetas fabricadas con una relación a/c: 0,5 y con diámetros de 30 y 71 mm, respectivamente.

Se puede apreciar en ambos casos, al igual que lo observado para la relación a/c 0,6, que para bajas densidades de corriente, el potencial es constante con el tiempo o muestra un leve incremento; mientras que para altos valores de densidad de corriente, el potencial

aumenta abruptamente durante el período inicial, para luego estabilizarse. En algunos casos también se observa un decrecimiento del potencial, probablemente debido al inicio de la fisuración de las probetas ensayadas. Cuando se detectó la aparición de fisuras macroscópicas, los ensayos se detuvieron previo a los 15 días previstos originalmente.

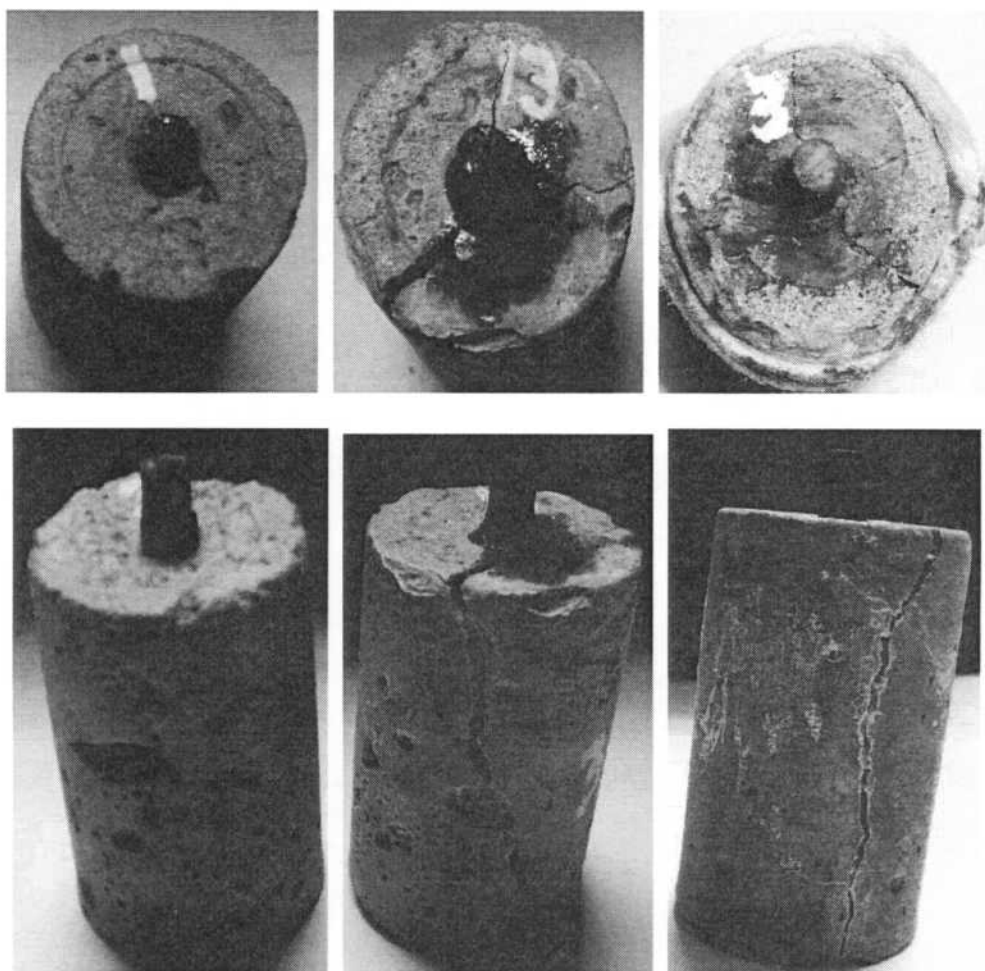


**Figura 3.6:** Evolución del potencial con el tiempo para las probetas de relación  $a/c$ : 0,5 y 30 mm de diámetro.

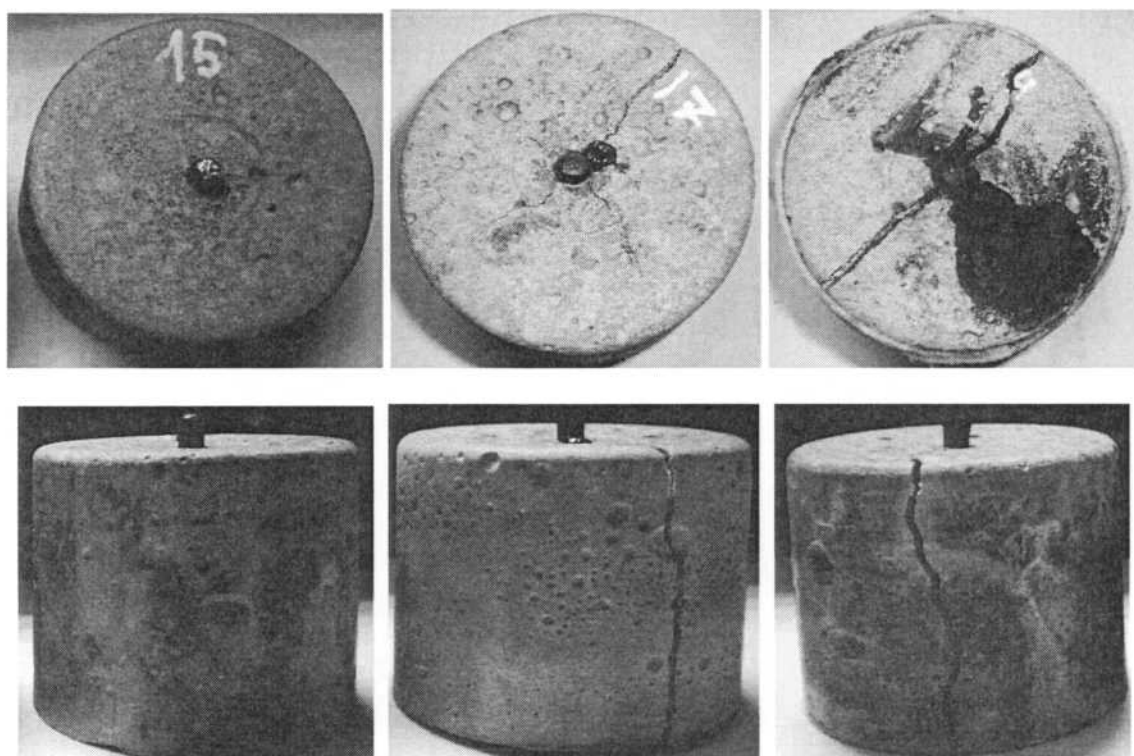


**Figura 3.7:** Evolución del potencial con el tiempo para las probetas de relación  $a/c$ : 0,5 y 71 mm de diámetro.

Una vez finalizado el período de ensayo se observó que las probetas de menor diámetro sometidas a  $250 \mu A/cm^2$ ,  $500 \mu A/cm^2$  y  $750 \mu A/cm^2$  presentaban fisuras en el recubrimiento de mortero, mientras que para las probetas de mayor diámetro solo las sometidas a  $500 \mu A/cm^2$  y  $750 \mu A/cm^2$  estaban fisuradas en dirección radial en la cara superior de las probetas y longitudinal paralela a la barra de refuerzo en la superficie lateral de las mismas. En algunos casos también se pudo observar la presencia de productos de corrosión en la cara superior de las probetas. En las figuras 3.8 y 3.9 se muestran fotografías de algunas de las probetas luego de concluido el período de ensayo.



**Figura 3.8:** Aspecto de las probetas de 30 mm de diámetro y a/c 0.5 luego de finalizado el período de ensayo a  $100 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ ,  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (de izquierda a derecha).



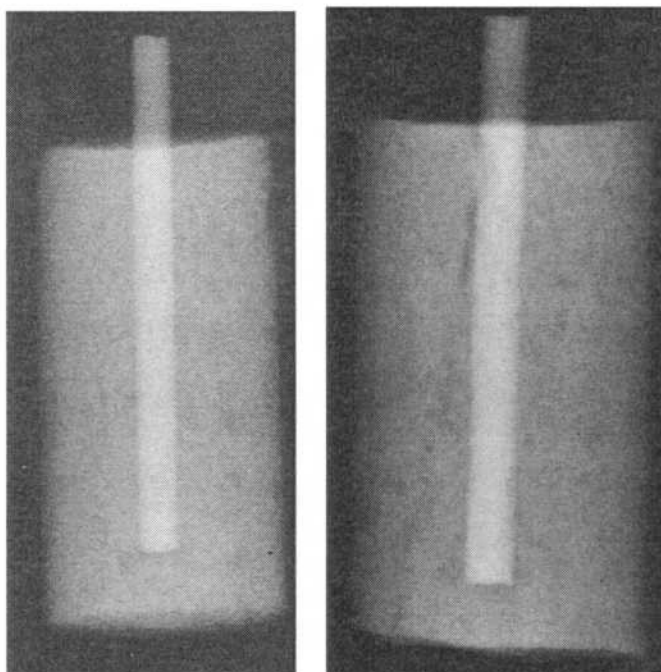
**Figura 3.9:** Aspecto de las probetas de 71 mm de diámetro y a/c 0.5 luego de finalizado el período de ensayo a  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ ,  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (de izquierda a derecha).

### **3.3 Análisis por gammagrafía:**

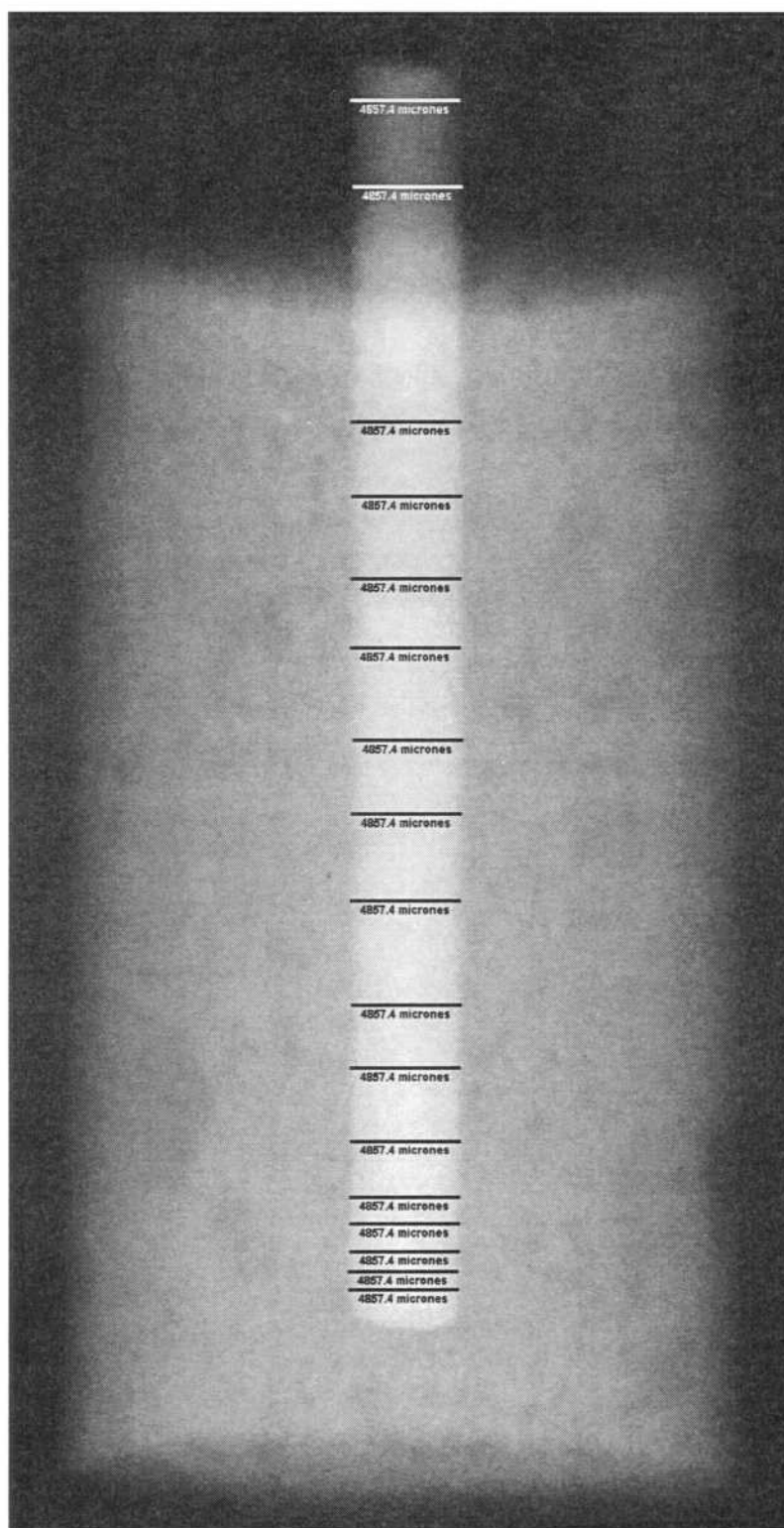
La descripción de los resultados de las gammagrafías se llevará a cabo según la relación a/c empleada: 0,6 y 0,5.

La figura 3.10 muestra las gammagrafías obtenidas para las probetas de menor diámetro, de relación a/c 0,6 sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y a  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ . Para la menor densidad de corriente se puede observar que la barra de refuerzo aparece lisa, sin imperfecciones notables a lo largo de su superficie y presenta un alto contraste con el mortero circundante. Sin embargo, la barra de refuerzo correspondiente a la probeta sometida a  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ , presenta ciertas irregularidades en su superficie y zonas de poca definición con el mortero circundante.

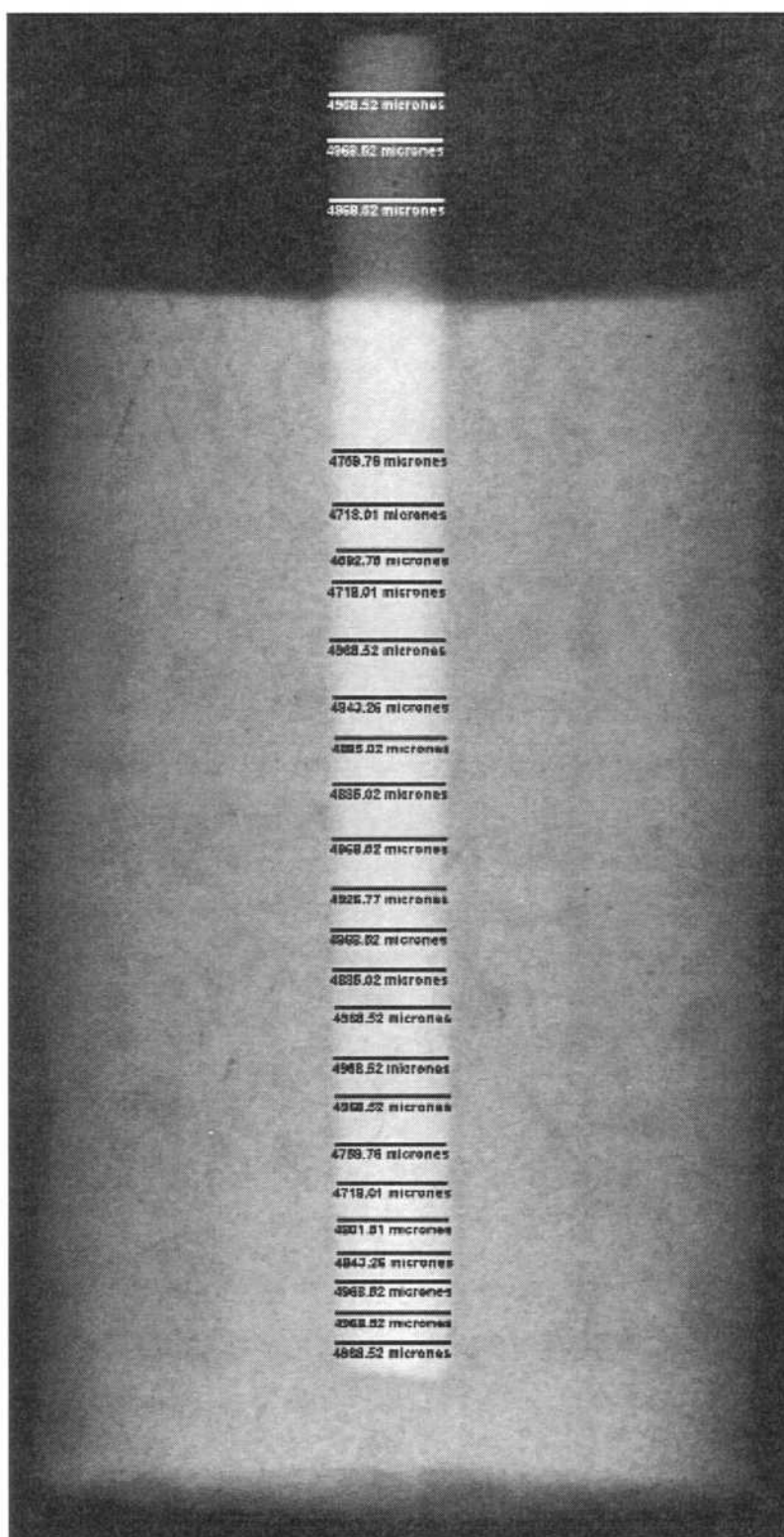
Las figuras 3.11, 3.12, 3.13 muestran las gammagrafías analizadas según lo detallado en 2.3, para las densidades de corriente de  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (dos probetas). En el primer caso, no se detectó disminución del diámetro de las barras debido a corrosión, mientras que en las probetas sometidas a  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  de densidad de corriente, se evidencia la presencia de corrosión localizada al realizar una comparación entre los diferentes valores de diámetro de la barra obtenidos en toda su longitud.



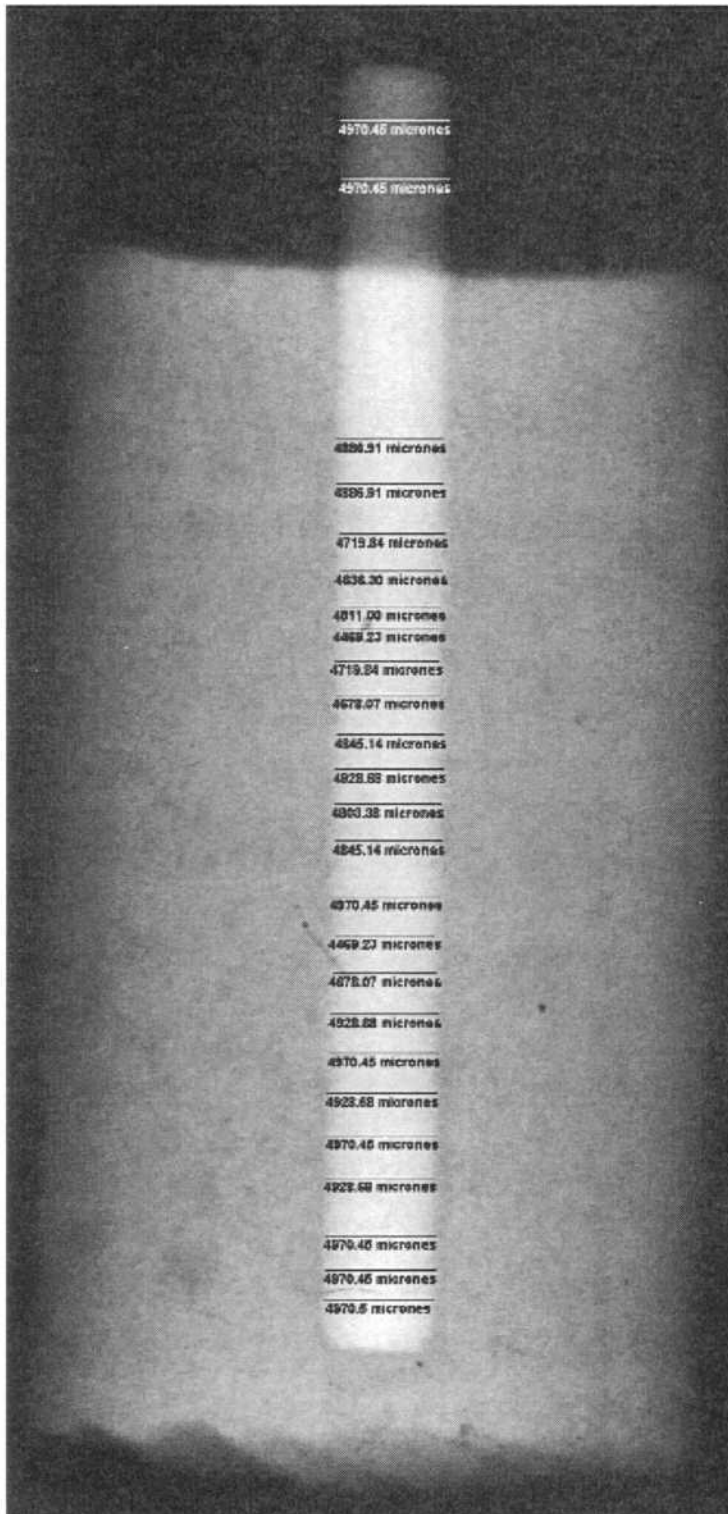
**Figura 3.10:** Gammagrafías obtenidas para las probetas de relación a/c 0,6, 30 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (izquierda) y  $500 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (derecha).



**Figura 3.11:** Análisis de la gammagrafía obtenida para una probeta de relación a/c 0,6 y 30 mm de diámetro sometida a  $50 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ .



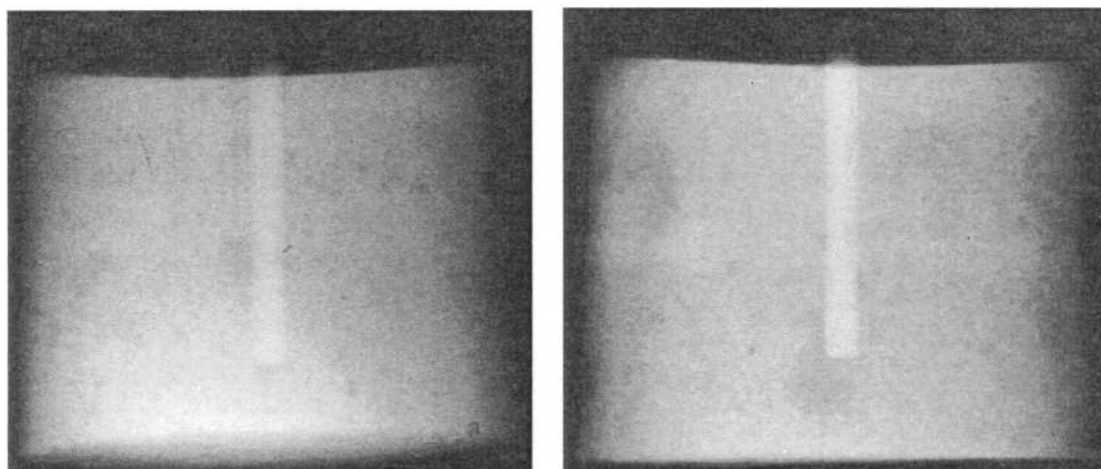
**Figura 3.12:** Análisis de la gammagrafía obtenida para una probeta de relación a/c 0,6 y 30 mm de diámetro sometida a  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ .



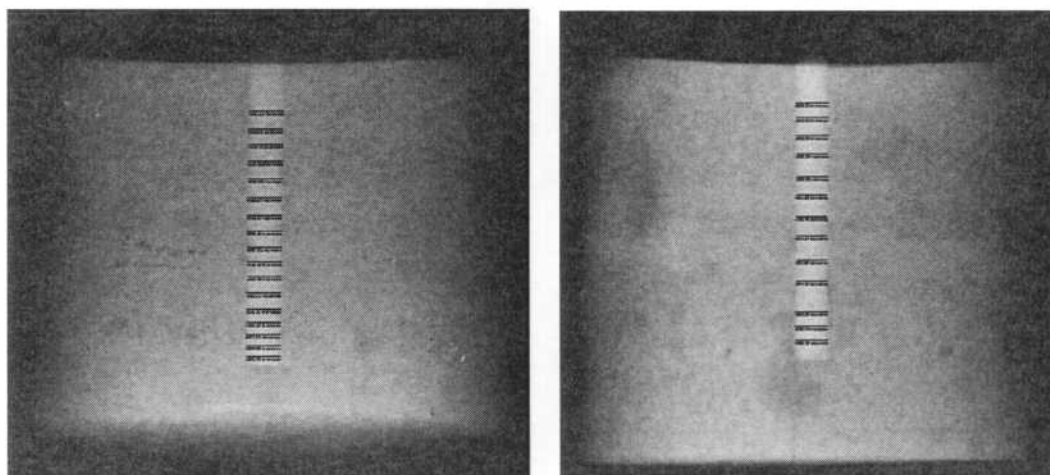
**Figura 3.13:** Análisis de la gammagrafía obtenida para una probeta de relación a/c 0,6 y 30 mm de diámetro sometida a  $250 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ .

En la figura 3.14 se observan las gammagrafías obtenidas para las probetas de mayor diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  y a  $750 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Para la menor densidad de corriente y, al igual que en el caso anterior, se puede observar que la apariencia de la barra de refuerzo es lisa y presenta un alto contraste con el mortero en el que está embebida. Sin embargo, la barra de refuerzo correspondiente a la probeta sometida a  $750 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , presenta ciertas alteraciones en su superficie y zonas de poca definición con el mortero circundante.

La figura 3.15 muestra las gammagrafías analizadas según lo descrito en 2.3 para las densidades de corriente anteriores. En el primer caso, no se aprecia una disminución en el diámetro de las barras, mientras que en el segundo caso, al comparar entre los diferentes valores medidos de diámetro a lo largo de la barra, se evidencia la presencia de corrosión localizada.



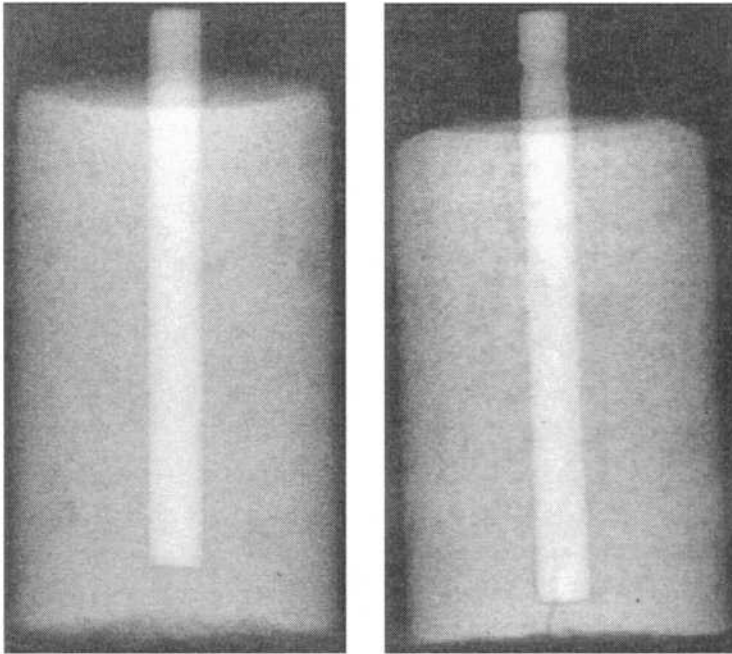
**Figura 3.14:** Gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,6 y 71 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (derecha).



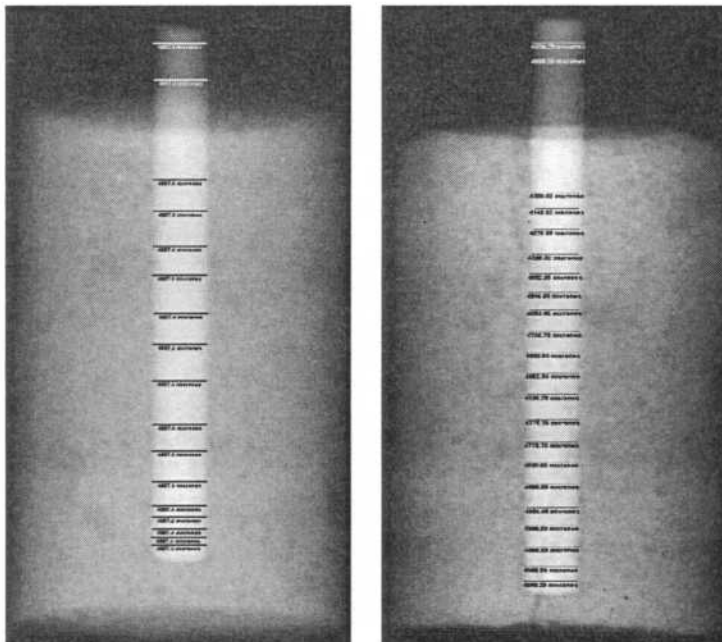
**Figura 3.15:** Análisis de la gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,6 y 71 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (derecha).

La figura 3.16 se muestra las gammagrafías obtenidas para las probetas de 30 mm de diámetro y relación a/c 0,5 sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ . Se puede observar que para  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ , la barra de refuerzo aparece sin imperfecciones notables a lo largo de su superficie y presenta un elevado contraste con el mortero circundante. Sin embargo, la probeta sometida a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ , presenta imperfecciones en su superficie y zonas de bajo contraste con el mortero adyacente.

La figura 3.17 muestra las gammagrafías analizadas para  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  y para  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ . Tal como se puede observar, para  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ , el diámetro de la barra permanece constante a lo largo de toda su longitud, mientras que para  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ , se observan disminuciones pronunciadas del diámetro de la barra, lo cual evidencia la presencia de corrosión localizada.



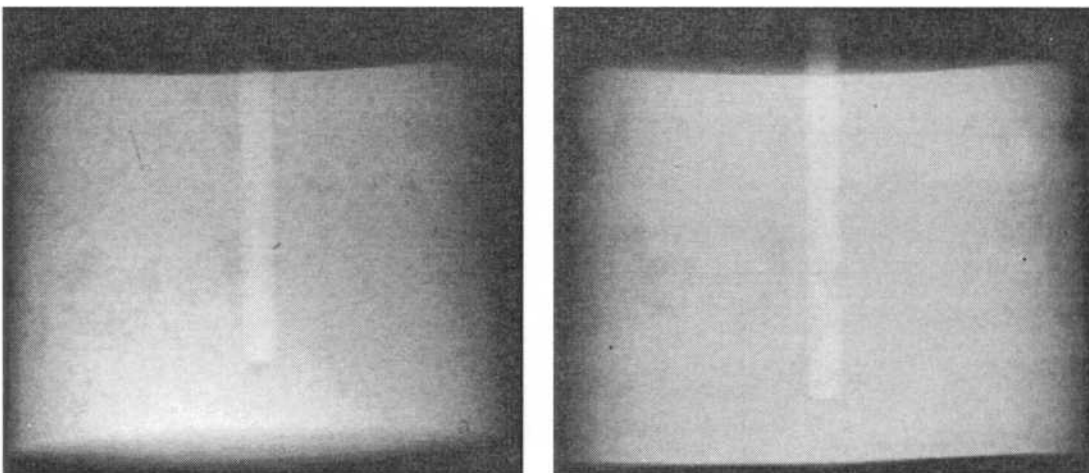
**Figura 3.16:** Gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,5 y 30 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (derecha).



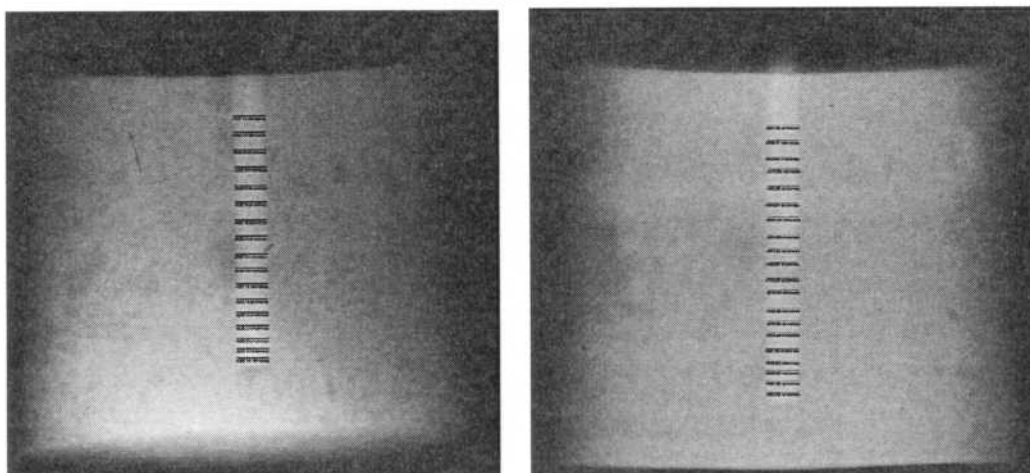
**Figura 3.17:** Análisis de la gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,5 y 30 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  (derecha).

En la figura 3.18 se muestran las gammagrafías obtenidas para las probetas de 71 mm de diámetro y relación a/c 0,5 sometidas a  $50 \mu\text{A.cm}^{-2}$  y a  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$ . Para el caso de la menor densidad de corriente, se observa que la barra de acero aparece lisa, sin detalles notables a lo largo de su superficie; mientras que, la barra de refuerzo correspondiente a la probeta sometida a  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , presenta irregularidades a lo largo de la misma, asociadas a la presencia de productos de corrosión.

Finalmente, la figura 3.19 muestra las gammagrafías analizadas para las densidades de corriente anteriores. Para  $50 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , no se detectó disminución del diámetro de las barras; mientras que para  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , se pone de manifiesto la presencia de corrosión localizada al observar las variaciones en los valores medidos de diámetro a lo largo del espécimen.



**Figura 3.18:** Gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,5 y 71 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (derecha).



**Figura 3.19:** Análisis de la gammagrafía obtenida para las probetas de relación a/c 0,5 y 71 mm de diámetro sometidas a  $50 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (izquierda) y a  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (derecha).

Siguiendo el procedimiento de análisis de imágenes ya descrito en 2.3, se midió la máxima profundidad de penetración asociada a corrosión localizada ( $\Delta\Phi_G$ ). En la tabla 3.1, se listan los valores obtenidos para cada densidad de corriente aplicada. Tal como se desprende de la tabla, solo se observó disminución del diámetro de las barras de refuerzo para aquellas probetas sometidas a altas densidades de corriente, esto es  $250 \mu\text{A.cm}^{-2}$ ,  $500 \mu\text{A.cm}^{-2}$  y  $750 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , aunque las probetas de relación a/c 0,5 de 71 mm de diámetro sometidas a  $100 \mu\text{A.cm}^{-2}$  también presentaron disminución del diámetro de sus barras de refuerzo.

Dado que el límite de detección de esta técnica es de  $92 \mu\text{m}$ , solo fue posible registrar disminuciones de diámetro mayores a este valor.



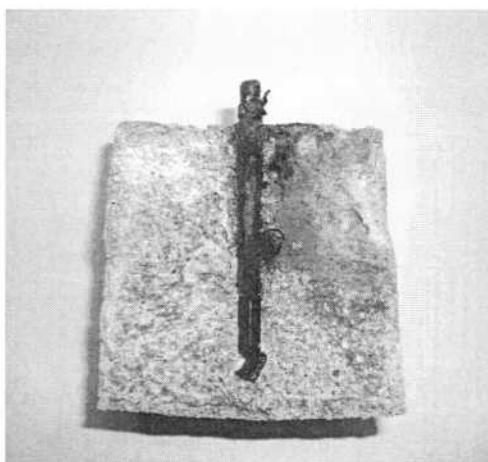
**Tabla 3.1** - Máxima profundidad de penetración asociada a corrosión localizada medida por gammagrafía.

| Relación a/c | Diámetro (mm) | $I_{apl} (\mu A.cm^{-2})$ | $\Delta\Phi_G (\mu m)^*$ |
|--------------|---------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,5          | 30            | 250                       | 200                      |
|              |               |                           | 140                      |
|              |               | 500                       | 250                      |
|              |               | 750                       | 840                      |
|              | 71            | 250                       | 750                      |
|              |               |                           | 120                      |
|              |               | 500                       | 125                      |
|              |               |                           | 290                      |
|              |               | 750                       | 290                      |
|              |               |                           | 780                      |
| 0,6          | 30            | 250                       | 600                      |
|              |               |                           | 380                      |
|              |               | 500                       | 500                      |
|              |               |                           | 180                      |
|              | 71            | 750                       | 100                      |
|              |               |                           | 200                      |
|              |               | 100                       | 100                      |
|              |               |                           | 100                      |

\*±92  $\mu m$

**3.4 Análisis por gravimetría**

Luego de realizadas las gammagrafías, las probetas fueron partidas en su dirección longitudinal (figura 3.20) para extraer la barra de acero y proceder a su decapado y determinar su pérdida de peso.



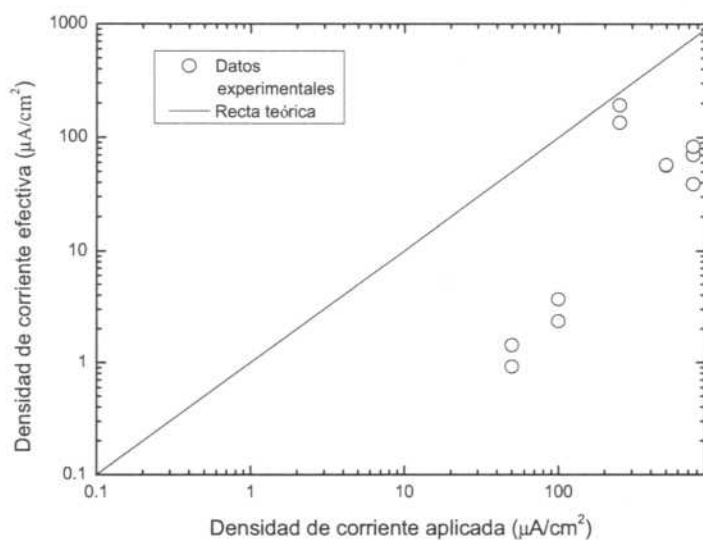
**Figura 3.20:** Corte longitudinal de una probeta de 71 mm de diámetro sometida a  $750 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  durante 15 días.

Al igual que en los puntos anteriores, la descripción de los resultados gravimétricos, se llevará a cabo según la relación a/c empleada: 0,6 y 0,5.

La tabla 3.2 muestra, para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 30 mm de diámetro, y para cada densidad de corriente aplicada, la pérdida de peso por unidad de área y de tiempo ( $w$ ) sufrida por las barras luego del proceso corrosivo. En la misma tabla se incluyen también la pérdida de diámetro asociada a esa pérdida de peso ( $\Delta\Phi_w$ ), asumiendo corrosión generalizada; y la densidad de corriente efectiva ( $i_{ef}$ ), calculada con la ecuación 2.1. Estos resultados fueron obtenidos luego del procedimiento de decapado descrito en la sección 2.4. Por su parte, la figura 3.21 muestra el gráfico de  $i_{ef}$  en función de  $i_{apl}$  donde la denominada *recta teórica* implica que toda la corriente aplicada se consumió en el proceso corrosivo, de allí que su pendiente sea de  $45^\circ$ .

**Tabla 3.2** – Resultados obtenidos a partir de los datos de pérdida de peso para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 30 mm de diámetro.

| $i_{apl} (\mu A/cm^2)$ | $w (g/cm^2 \cdot año)$ | $\Delta\Phi_w (\mu m)$ | $i_{ef} (\mu A \cdot cm^{-2})$ |
|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 50                     | $0,0130 \pm 0,0005$    | $1,36 \pm 0,03$        | $1,4 \pm 0,1$                  |
| 50                     | $0,0084 \pm 0,0005$    | $0,87 \pm 0,03$        | $0,9 \pm 0,1$                  |
| 100                    | $0,0213 \pm 0,0006$    | $3,51 \pm 0,03$        | $2,3 \pm 0,1$                  |
| 100                    | $0,0337 \pm 0,0006$    | $2,22 \pm 0,03$        | $3,7 \pm 0,1$                  |
| 250                    | $1,2322 \pm 0,0034$    | $128,68 \pm 0,18$      | $135,0 \pm 0,4$                |
| 250                    | $1,7483 \pm 0,0046$    | $182,58 \pm 0,24$      | $191,6 \pm 0,5$                |
| 500                    | $0,5175 \pm 0,0017$    | $54,05 \pm 0,09$       | $56,7 \pm 0,2$                 |
| 500                    | $0,5232 \pm 0,0020$    | $38,24 \pm 0,07$       | $57,3 \pm 0,2$                 |
| 750                    | $0,3541 \pm 0,0052$    | $4,38 \pm 0,03$        | $38,8 \pm 0,6$                 |
| 750                    | $0,6378 \pm 0,0034$    | $18,13 \pm 0,05$       | $69,9 \pm 0,4$                 |
| 750                    | $0,7591 \pm 0,0024$    | $63,42 \pm 0,10$       | $83,2 \pm 0,3$                 |

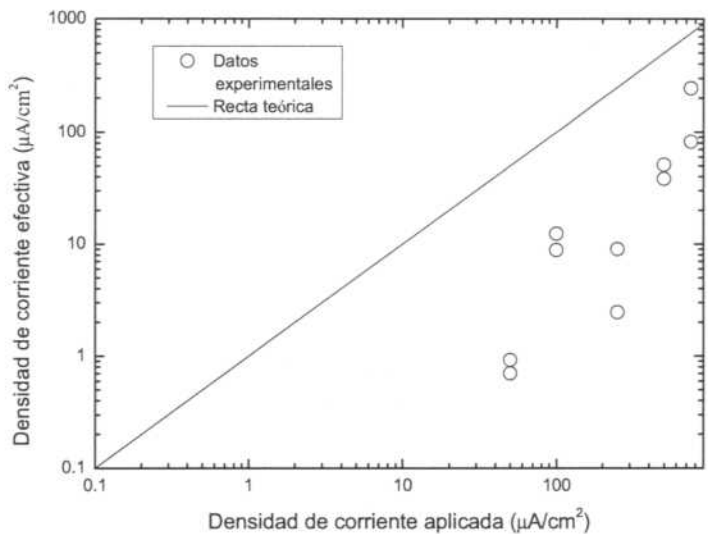


**Figura 3.21:** Densidad de corriente efectiva en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 30 mm de diámetro.

En la tabla 3.3 se listan los valores de  $w$ ,  $\Delta\Phi_w$  y  $i_{ef}$ , para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 71 mm de diámetro y la figura 3.22 muestra el gráfico de  $i_{ef}$  en función de  $i_{apl}$ .

**Tabla 3.3** – Resultados obtenidos a partir de los datos de pérdida de peso para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 71 mm de diámetro.

| $i_{apl}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | $w$ ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{año}$ ) | $\Delta\Phi_w$ ( $\mu\text{m}$ ) | $i_{ef}$ ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 50                                      | $0,0064 \pm 0,0006$                             | $0,64 \pm 0,03$                  | $0,7 \pm 0,1$                                   |
| 50                                      | $0,0084 \pm 0,0005$                             | $0,86 \pm 0,03$                  | $0,9 \pm 0,1$                                   |
| 100                                     | $0,0805 \pm 0,0007$                             | $8,06 \pm 0,04$                  | $8,8 \pm 0,1$                                   |
| 100                                     | $0,1127 \pm 0,0008$                             | $11,05 \pm 0,04$                 | $12,3 \pm 0,1$                                  |
| 250                                     | $0,0824 \pm 0,0007$                             | $8,25 \pm 0,04$                  | $9,0 \pm 0,1$                                   |
| 250                                     | $0,0225 \pm 0,0006$                             | $2,21 \pm 0,03$                  | $2,5 \pm 0,1$                                   |
| 500                                     | $0,4664 \pm 0,0018$                             | $35,99 \pm 0,07$                 | $51,1 \pm 0,2$                                  |
| 500                                     | $0,3486 \pm 0,0016$                             | $24,77 \pm 0,06$                 | $38,2 \pm 0,2$                                  |
| 750                                     | $0,7501 \pm 0,0029$                             | $36,56 \pm 0,07$                 | $82,2 \pm 0,3$                                  |
| 750                                     | $2,2319 \pm 0,0058$                             | $196,83 \pm 0,26$                | $244,6 \pm 0,6$                                 |

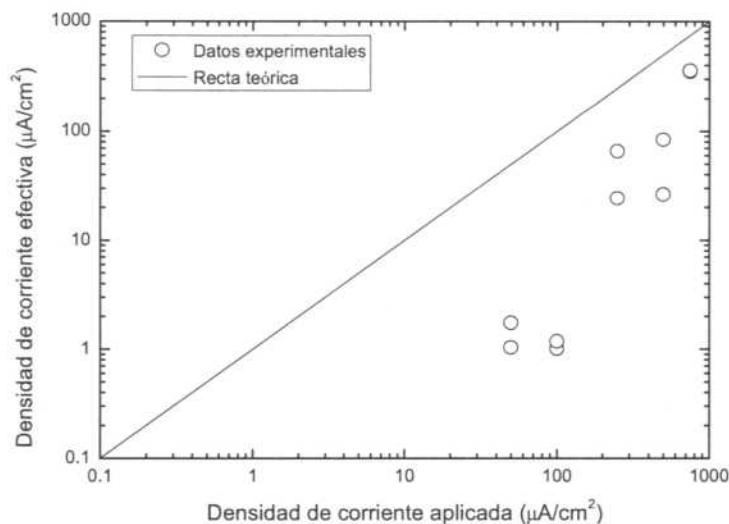


**Figura 3.22:** Densidad de corriente efectiva en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 71 mm de diámetro.

En la tabla 3.4 se registran los valores que se obtuvieron del análisis gravimétrico ( $w$ ,  $\Delta\Phi_w$  y  $i_{ef}$ ) para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 30 mm de diámetro. En la figura 3.23 se muestra el gráfico de  $i_{ef}$  en función de  $i_{apl}$ .

**Tabla 3.4** – Resultados obtenidos a partir de los datos de pérdida de peso para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 30 mm de diámetro.

| $i_{apl}$ ( $\mu A/cm^2$ ) | $w$ ( $g/cm^2 \cdot año$ ) | $\Delta\Phi_w$ ( $\mu m$ ) | $i_{ef}$ ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ ) |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 50                         | $0,0095 \pm 0,0005$        | $0,99 \pm 0,03$            | $1,0 \pm 0,1$                      |
| 50                         | $0,0160 \pm 0,0006$        | $1,67 \pm 0,03$            | $1,7 \pm 0,1$                      |
| 100                        | $0,0092 \pm 0,0005$        | $0,97 \pm 0,03$            | $1,0 \pm 0,1$                      |
| 100                        | $0,0108 \pm 0,0005$        | $1,13 \pm 0,03$            | $1,2 \pm 0,6$                      |
| 250                        | $0,6015 \pm 0,0019$        | $62,82 \pm 0,10$           | $65,9 \pm 0,2$                     |
| 250                        | $0,2220 \pm 0,0010$        | $23,18 \pm 0,05$           | $24,3 \pm 0,1$                     |
| 500                        | $0,7605 \pm 0,0023$        | $79,42 \pm 0,12$           | $83,3 \pm 0,1$                     |
| 500                        | $0,2404 \pm 0,0013$        | $17,78 \pm 0,05$           | $26,3 \pm 0,1$                     |
| 750                        | $3,2158 \pm 0,0080$        | $320,00 \pm 0,40$          | $352,4 \pm 0,9$                    |
| 750                        | $3,2677 \pm 0,0082$        | $281,55 \pm 0,36$          | $358,1 \pm 0,9$                    |

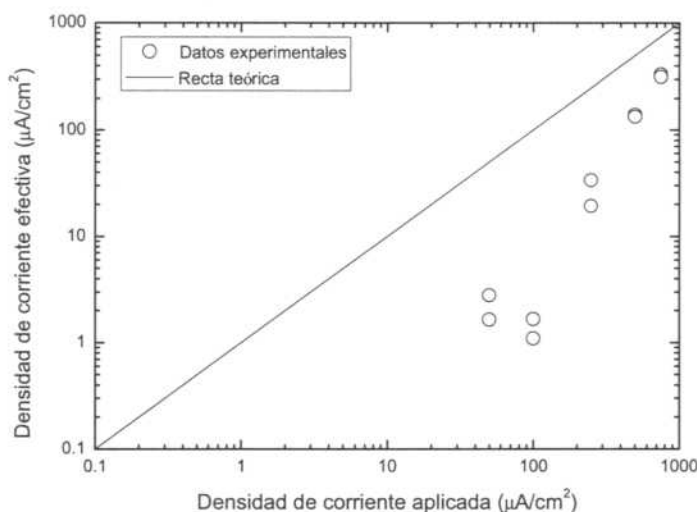


**Figura 3.23:** Densidad de corriente efectiva en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 30 mm de diámetro.

Para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 71 mm de diámetro se listan los valores de  $w$ ,  $\Delta\Phi_w$  y  $i_{ef}$  en la tabla 3.5; y en la figura 3.24 se muestra el gráfico de  $i_{ef}$  en función de  $i_{apl}$ .

**Tabla 3.5** – Resultados obtenidos a partir de los datos de pérdida de peso para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 71 mm de diámetro.

| $i_{apl}$ ( $\mu A/cm^2$ ) | $w$ ( $g/cm^2 \cdot año$ ) | $\Delta\Phi_w$ ( $\mu m$ ) | $i_{ef}$ ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ ) |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 50                         | $0,0255 \pm 0,0006$        | $2,64 \pm 0,03$            | $2,8 \pm 0,1$                      |
| 50                         | $0,0150 \pm 0,0006$        | $1,56 \pm 0,03$            | $1,6 \pm 0,1$                      |
| 100                        | $0,0152 \pm 0,0006$        | $1,58 \pm 0,03$            | $1,7 \pm 0,1$                      |
| 100                        | $0,0100 \pm 0,0005$        | $1,05 \pm 0,03$            | $1,1 \pm 0,1$                      |
| 250                        | $0,1768 \pm 0,0009$        | $18,46 \pm 0,05$           | $19,4 \pm 0,1$                     |
| 250                        | $0,3085 \pm 0,0012$        | $32,22 \pm 0,06$           | $33,8 \pm 0,1$                     |
| 500                        | $1,2831 \pm 0,0035$        | $130,39 \pm 0,18$          | $140,6 \pm 0,4$                    |
| 500                        | $1,2196 \pm 0,0034$        | $127,37 \pm 0,18$          | $133,6 \pm 0,4$                    |
| 750                        | $3,0519 \pm 0,0076$        | $318,73 \pm 0,40$          | $334,4 \pm 0,8$                    |
| 750                        | $2,8949 \pm 0,0073$        | $302,33 \pm 0,38$          | $317,2 \pm 0,8$                    |



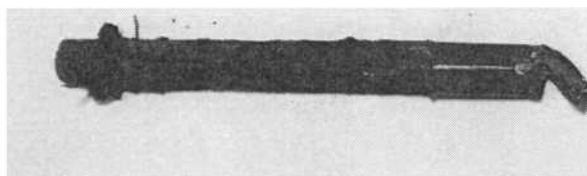
**Figura 3.24:** Densidad de corriente efectiva en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 71 mm de diámetro.

### **3.5 Caracterización de los productos de corrosión**

Con el propósito de caracterizar los productos de corrosión formados durante los ensayos de corrosión acelerada, se llevaron a cabo observaciones de las barras corroídas con el microscopio electrónico de barrido; como así también análisis por espectroscopía Raman y Mossbauer de transmisión.

#### **3.5.1 Microscopía electrónica de barrido**

A efectos de disponer de una barra con la mayor cantidad de productos de corrosión posibles, se utilizó una correspondiente a la relación a/c 0,6 y de 30 mm de diámetro, sometida a una densidad de corriente de  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  durante 6 días, para evitar su fisuración excesiva. En la figura 3.25 se observa el aspecto macroscópico de la barra una vez extraída de la probeta de mortero; mientras que en la figura 3.26 se muestran las micrografías obtenidas.

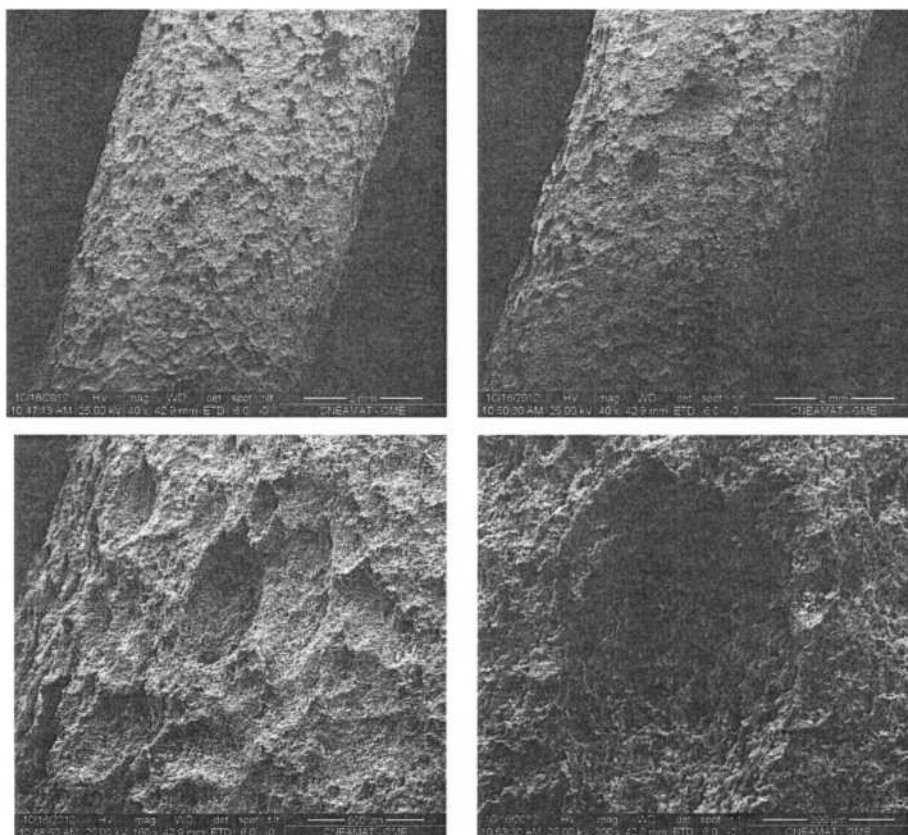


**Figura 3.25:** Macrografía de la barra utilizada para su observación con el microscopio electrónico de barrido.



de los cristales en forma de placas finas, en una estructura del tipo floral, la cual se asocia a *lepidocrocita*, mientras que la figura 3.26 (f) muestra una estructura globular del tipo “nube de algodón”, asociada, posiblemente, a *akaganeíta*. Las morfologías observadas ya habían sido reportadas por varios autores [1-8].

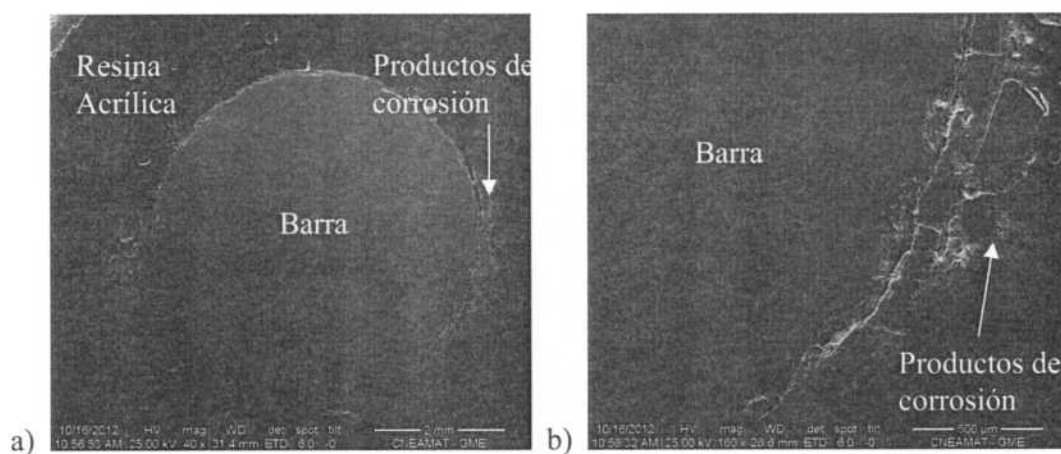
En la figura 3.27 se muestran las micrografías realizadas sobre algunas de las barras de refuerzo luego de la eliminación de los productos de corrosión, donde se evidencia la presencia de corrosión localizada, consistente con lo determinado por medio de las gammagrafías.



**Figura 3.27:** Micrografías que evidencian la presencia de corrosión localizada en la barra de una probeta de relación a/c 0,6 y 30 mm de diámetro sometida a  $750 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$  durante 6 días.

### 3.5.2 Espectroscopía Raman:

En la figura 3.28 se muestra una micrografía obtenida con el microscopio electrónico de barrido (SEM) de una barra de acero incluida en resina acrílica, con sus productos de corrosión. En la figura 3.28 (a) se observa la barra rodeada, prácticamente en su totalidad, por productos de corrosión, mientras que en la figura 3.28 (b) se aprecia el espesor de las capas de óxidos formados y también se puede observar la presencia de fisuras que atraviesan dichas capas. Esa misma barra fue la utilizada para el estudio por microscopía Raman.

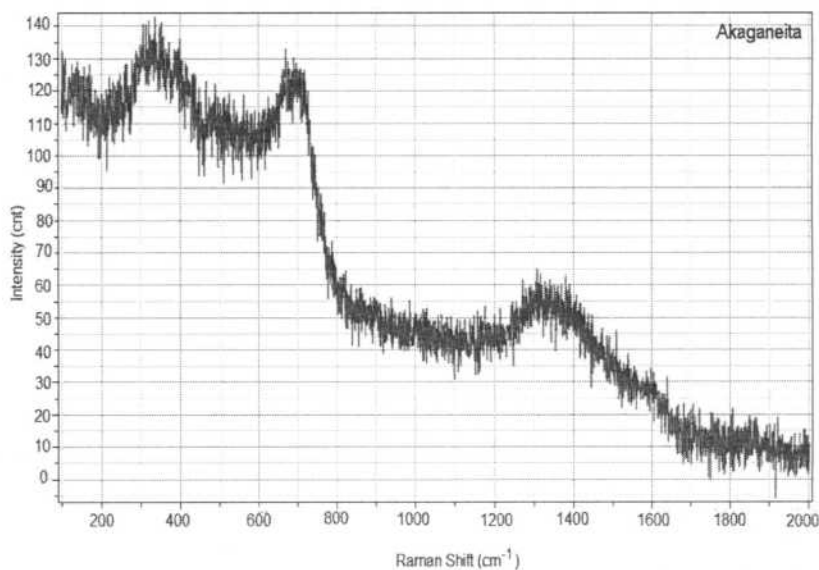


**Figura 3.28:** Imágenes obtenidas en SEM para la probeta utilizada en espectroscopía Raman.

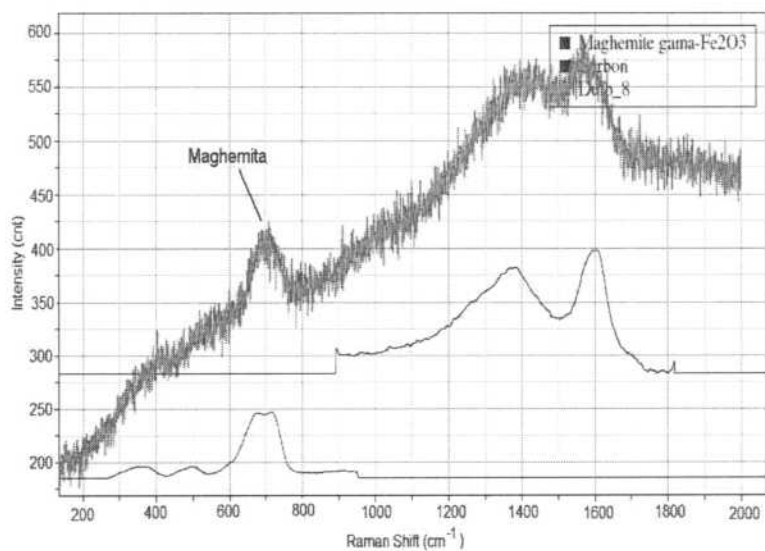
Las figuras 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32 muestran los espectros Raman obtenidos en distintas regiones de la capa de productos de corrosión.

En la figura 3.29 se observa uno de los espectros Raman obtenidos donde el compuesto correspondiente no figuraba en la base de datos consultada. Su identificación se realizó por comparación con bibliografía disponible [9] correspondiendo a *akaganeita* ( $\beta$ -FeOOH). En la figura 3.30 se observa el espectro correspondiente a una zona de la muestra en la que se identificó *maghemita* ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cuyo pico característico se ubica en 700 cm<sup>-1</sup>, y carbono

(1400 y 1500  $\text{cm}^{-1}$ ) proveniente de impurezas, siendo el espectro superior el obtenido, y los inferiores, los patrones.



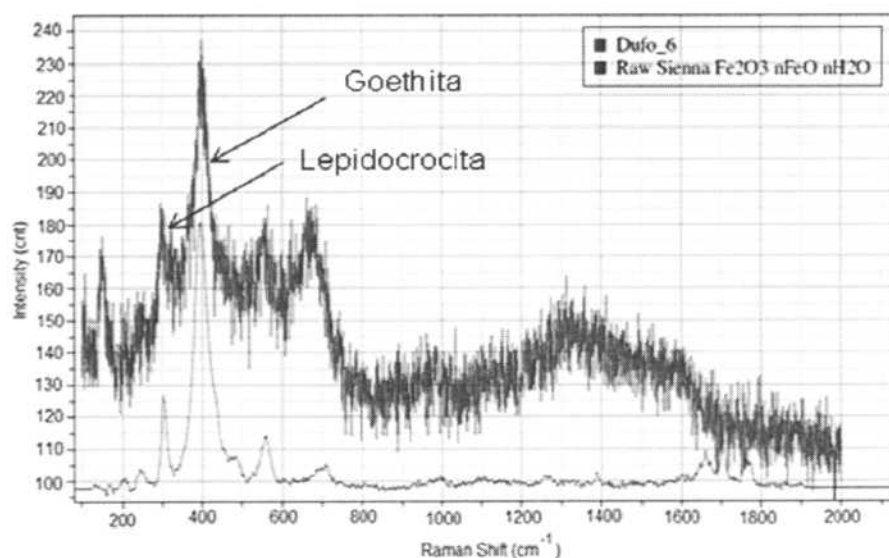
**Figura 3.29:** Espectro Raman correspondiente a *akaganeita*.



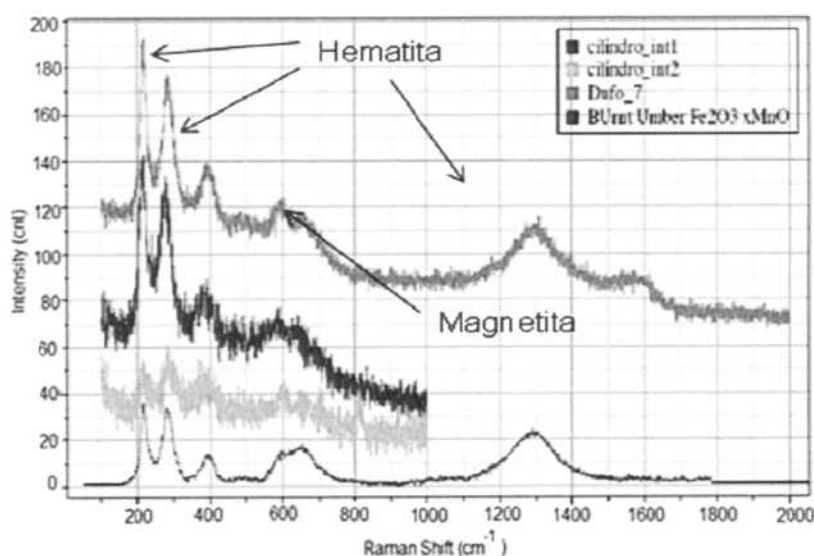
**Figura 3.30:** Espectro Raman correspondiente a *maghemita*.

En la figura 3.31 se observa el espectro obtenido en otra zona de los productos de corrosión (espectro superior) y el ajuste propuesto por la base de datos utilizada (espectro

inferior). De la comparación de ambos espectros surge que la zona analizada estaba compuesta de *lepidocrocita* ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ) ( $300\text{ cm}^{-1}$ ) y *goethita* ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) ( $400\text{ cm}^{-1}$ ). En la figura 3.32 se observan los espectros obtenidos en tres regiones distintas de la capa de productos de corrosión y corresponden, según el patrón inferior, a *hematita* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) cuyos picos característicos se ubican en  $220$ ,  $300$ ,  $1300\text{ cm}^{-1}$ , y a *magnetita* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) cuyo pico característico se ubica en  $700\text{ cm}^{-1}$ .



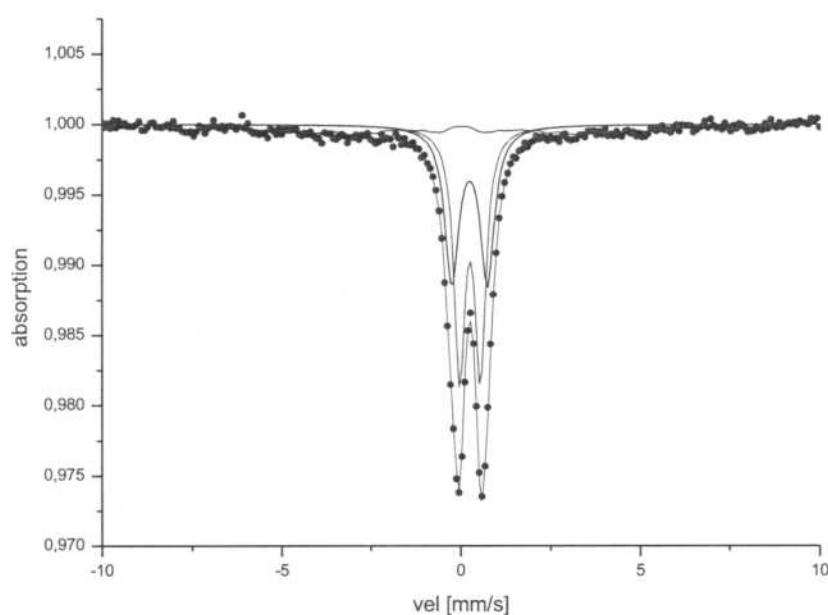
**Figura 3.31:** Espectro Raman correspondiente a *lepidocrocita* y *goethita*.



**Figura 3.32:** Espectro Raman correspondiente a *hematita* y *magnetita*.

### 3.5.3 Espectroscopía Mossbauer

En la figura 3.33 se muestra el espectro Mossbauer obtenido a temperatura ambiente para una muestra en polvo de los productos de corrosión recolectados antes del proceso de decapado raspando la superficie corroída de las barras.

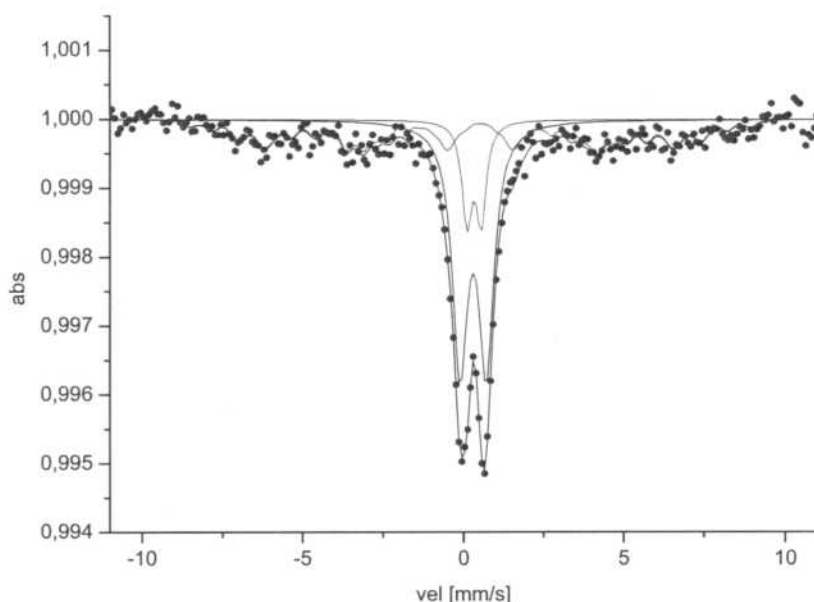


**Figura 3.33:** Espectro Mossbauer a temperatura ambiente con su ajuste correspondiente.

El ajuste del espectro a temperatura ambiente se realizó con dos dobletes característicos de  $\text{Fe}^{3+}$  que conforman alrededor del 84% de los compuestos de Fe presentes en la muestra. Estos dobletes corresponderían a *akaganeita* con parámetros hiperfinos CI: 0.38 mm/s, DC: 0.58 mm/s en el caso de un doblete y CI: 0.37 mm/s, DC: 0.99 mm/s para el otro doblete cuadrupolar. La *akaganeita* es estable sólo en ambientes clorados. Sin embargo no puede descartarse la presencia de *lepidocrocita* y/o *ferrihidrita*. Otros compuestos de Fe minoritarios, identificados en la parte magnética del espectro (sextetos) serían: sulfuros de Fe no estequiométricos (o sea *pirrotitas* intermedias de tipo  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  con  $0 < x < 0.2$ ), magnetita y/o *maghemita* no estequiométrica, *goethita* y *hematita*.

Para realizar una asignación de fases más certera se corrió además un espectro a baja temperatura, 20 K (figura 3.34). A partir del ajuste se observa que la fracción magnética/paramagnética aumenta, de acuerdo con el comportamiento esperado para los óxidos e hidróxidos presentes en la muestra, mostrando el ordenamiento magnético de las fases que a temperatura ambiente están desordenadas. Mediante este análisis se confirmaron los resultados obtenidos a través del espectro a temperatura ambiente.

Resumiendo, los compuestos de Fe presentes en la muestra serían: *akaganeita* y *lepidocrocita*, y en cantidades menores *pirrotitas* intermedias, *magnetita*, *maghemita*, *goethita* y *hematita*.



**Figura 3.34:** Espectro Mossbauer a 20 K con su ajuste correspondiente.



## Referencias

- [1] A. Razvan y A. Raman, "Morphology of rust phases formed on naturally weathered weathering steels in bridge spans", *Pract. Met.* 23, 223-236 (1986).
- [2] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico y M. Morcillo, "Long-term atmospheric corrosion of mild steel", *Corrosion Science* 53, 604-617 (2011).
- [3] A. Raman, A. Razvan, B. Kuban, K.A. Clement y W.E. Graves, "Characteristics of the rust from weathering steels in Louisiana bridge spans", *Corrosion* 42(8), 447-455, NACE International (1986).
- [4] A. Raman y S. Nasrazadani, "Packing corrosion in bridge structures", *Corrosion* 46(7), 601-605, NACE International (1990).
- [5] C. Feigenbaum, L. Gal-Or y J. Yahalom, "Microstructure and chemical composition of natural scale layers", *Corrosion*, 34(2), 64-73 (1978).
- [6] A. Raman, S. Nasrazadani y L. Shatma, "Morphology of rust phases formed on weathering steels in various laboratory corrosion tests", *Metallography*, 22(1), 79-96 (1989).
- [7] G.S. Duffó, M. Reinoso, C.P. Ramos y S.B. Farina, "Characterization of steel rebars embedded in a 70 year old concrete structure", *Cement and Concrete Research*, 42, 111-117 (2012).
- [8] G:S: Duffó, W. Morris, I. Raspini y C. Saragovi, "A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years", *Corrosion Science*, 46, 2143-2157 (2004).
- [9] F. Dubois, C. Mendibide, T. Pagnier, F. Perrad y C. Duret, "Raman mapping of corrosion products formed onto spring steels during salt spray experiments. A correlation



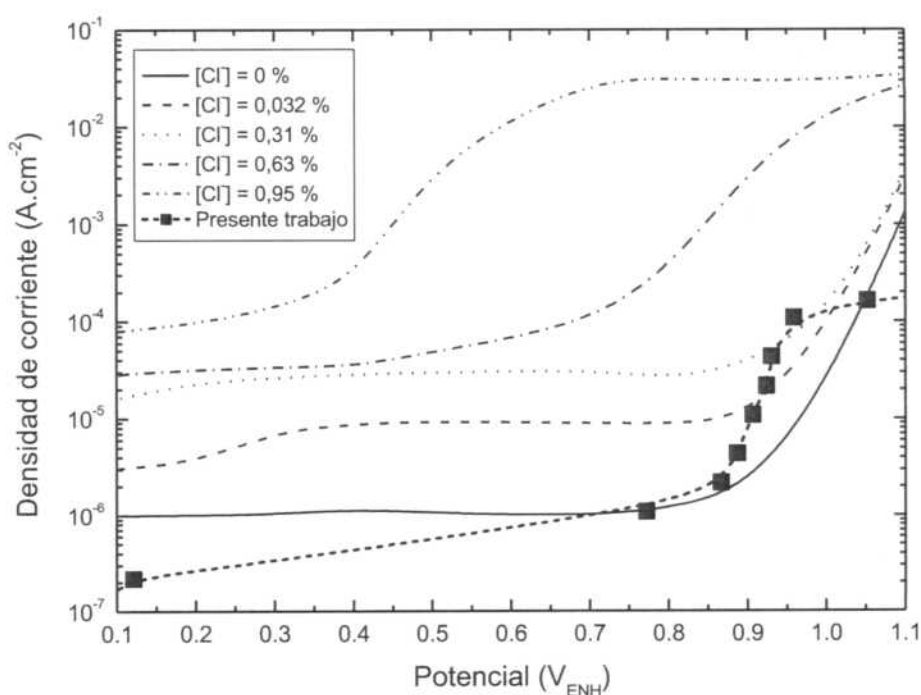
between the scale composition and the corrosion resistance”, Corrosion Science, 50, 3401-3409 (2008).

# CAPÍTULO 4

## DISCUSIÓN

#### 4.1 Curvas de polarización

En la figura 4.1 se muestra la curva de polarización del acero embebido en mortero de relación a/c 0,6 y 30 mm de diámetro, comparada con las obtenidas por Nossoni y Harichandran [1] para un material similar, pero en soluciones simuladas de poro con y sin el agregado de iones cloruro, de pH aproximadamente igual a 13. Se puede observar que el aspecto general de la curva obtenida en el presente trabajo en mortero es similar al correspondiente a soluciones conteniendo entre 0,032% y 0,31% de cloruro: una zona pasiva hasta alcanzar un potencial donde la densidad de corriente sube abruptamente. Este incremento de corriente puede ser debido al desprendimiento de oxígeno, a la aparición de corrosión localizada (picado) o a ambos procesos simultáneamente.



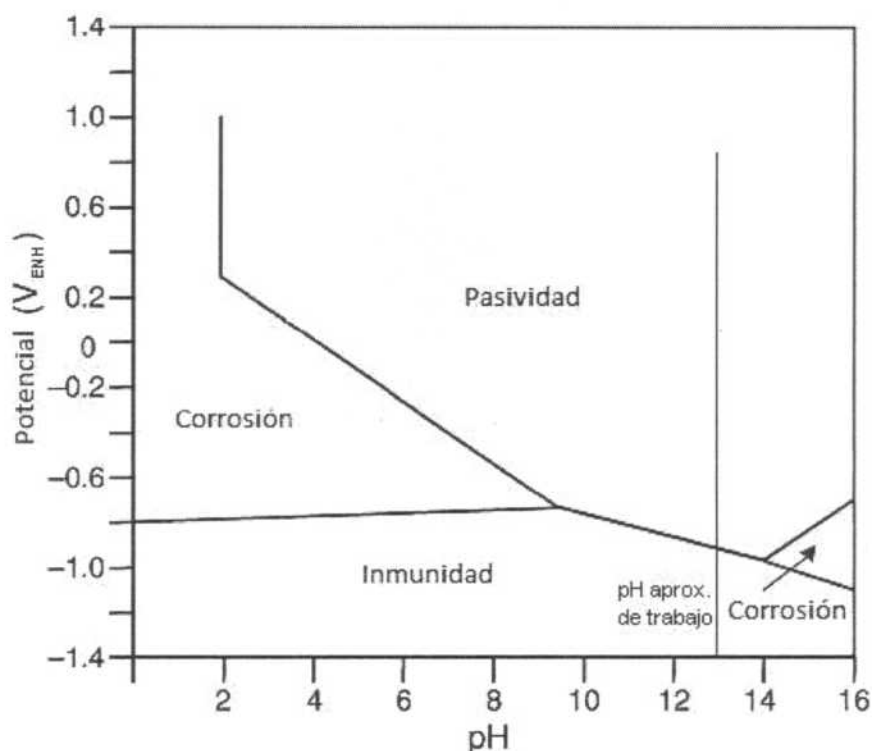
**Figura 4.1:** Curvas de polarización del acero obtenidas en soluciones simuladas de poro con y sin el agregado de cloruro [1], y la obtenida en el presente trabajo para acero embebido en mortero.

La existencia de picado sobre las barras de acero fue confirmada por las observaciones microscópicas detalladas en el capítulo anterior y su origen está dado por el contenido de cloruro presente en el mortero utilizado. Los iones cloruro provienen del propio cemento (0,06 %) y de la arena empleada (0,08 %), tal como se detalla en la Tabla 2.2. Teniendo en cuenta que la relación arena/cemento utilizada en la fabricación de las probetas fue igual a tres, el contenido total de cloruros en las probetas ensayadas es de 0,3 % respecto del contenido de cemento. A pesar de las discrepancias encontradas en la literatura respecto al contenido mínimo de cloruros para generar ataque localizado, esta concentración es superior al umbral frecuentemente establecido [2,3,4].

Si bien los resultados obtenidos en solución y en mortero no pueden ser comparados directamente, 0,3 % de cloruro respecto de cemento en un mortero, puede ser considerado equivalente a una concentración de cloruros en solución simulada de poros de, aproximadamente, 0,31 %, tal como se desprende de la figura 4.1. Ese valor será tenido en cuenta a continuación para justificar electroquímicamente la aparición de corrosión localizada en los ensayos del presente trabajo.

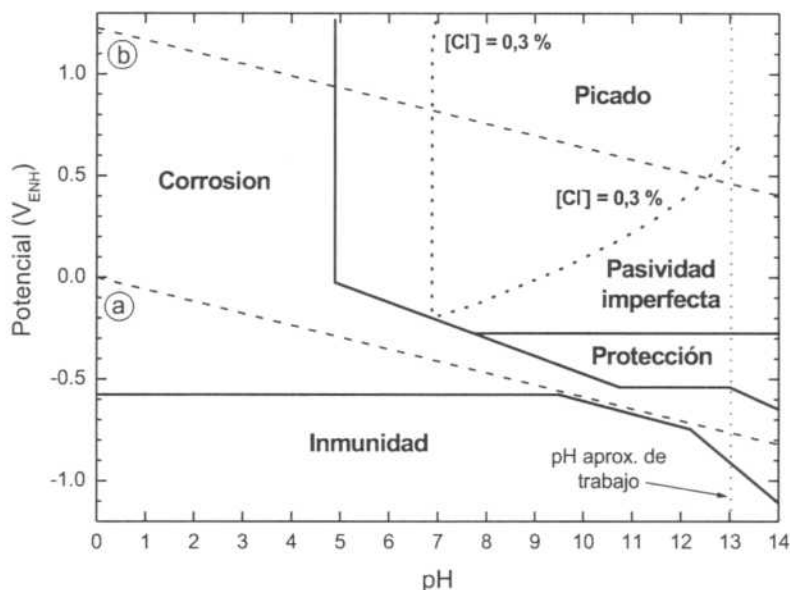
La figura 4.2 muestra el diagrama de Pourbaix del sistema  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}$  [5]. Se puede apreciar que al pH aproximado del hormigón ( $\text{pH}=13$ ), solo existen dos regiones termodinámicamente probables: inmunidad y pasividad, según el potencial del electrodo. La figura 4.3 muestra el diagrama de Pourbaix del sistema  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}/\text{Cl}^-$  correspondiente a una concentraciones de cloruro del 0,3% [6,7]. Tal como demostró Pourbaix [8] las picaduras comienzan a crecer a potenciales iguales o por sobre el potencial de picado, pero pueden seguir propagándose aun cuando el potencial aplicado está por debajo del potencial de picado. Estas picaduras dejarán de crecer únicamente cuando el potencial sea menor a un cierto potencial denominado *potencial de repasivación* o *potencial de protección*. Por esta razón, la zona de pasividad de los diagramas  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}$ , en los diagramas correspondientes al sistema  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}/\text{Cl}^-$  se divide en tres zonas: zona de picado, cuyo límite inferior está dado por el potencial de picado; zona de pasividad imperfecta, limitado entre el potencial de repasivación (límite inferior) y el potencial de picado (límite superior), y zona de pasividad

perfecta, limitada entre el potencial termodinámico de formación de la película pasiva (límite inferior) y el potencial de repasivación (límite superior).



**Figura 4.2:** Diagrama de Pourbaix del sistema Fe/H<sub>2</sub>O [5] donde se muestra la condición de pH correspondientes al presente trabajo.

De la figura 4.3, se desprende que para las condiciones empleadas en el presente trabajo (tal como se indicó más arriba, la concentración de cloruro presente en el mortero en estudio es simulada por una concentración de cloruro en solución igual al 0,3%) y a los potenciales correspondientes a las densidades de corriente empleadas para generar corrosión acelerada (mayores que 0,8 V<sub>ENH</sub>) el material está sufriendo picado. Por ese motivo, es que tanto en la observación microscópica como en la determinación por gammagrafía se detectó la presencia de corrosión localizada. Por otra parte, la presencia de *akageneita* como uno de los productos de corrosión mayoritarios, es una clara indicación de la presencia de iones cloruros en el medio como causantes del proceso corrosivo.

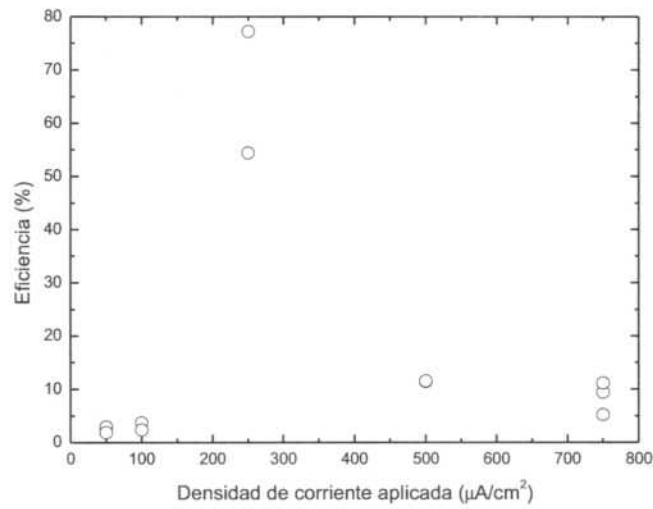


**Figura 4.3:** Diagrama de Pourbaix del sistema  $Fe/H_2O/Cl^-$  para una concentración de cloruro igual al 0,3% donde se muestra las condiciones de pH correspondientes al presente trabajo [7].

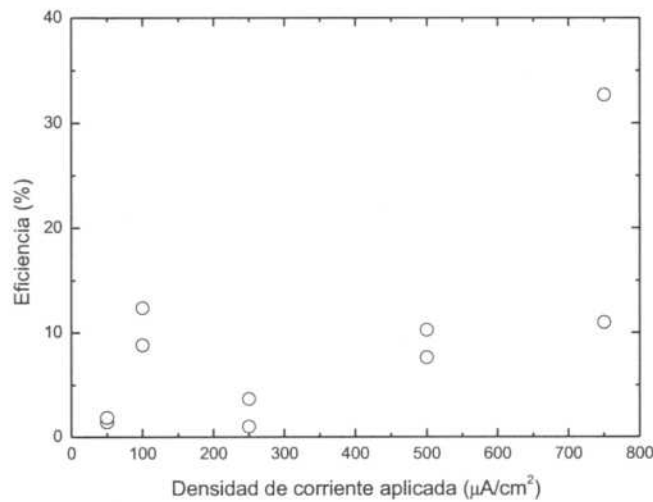
## 4.2 Corrosión acelerada

### 4.2.1 Eficiencia de corriente:

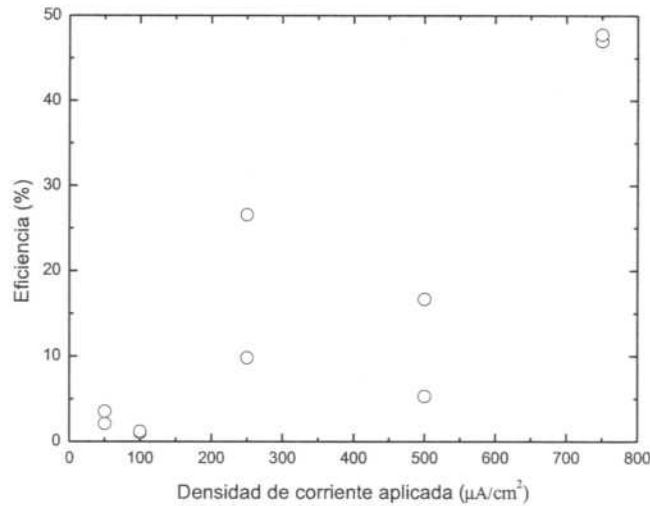
En la figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran las eficiencias de corriente (calculadas con la ecuación 2.2) en función de la densidad de corriente aplicada, para las cuatro condiciones ensayadas: relación a/c 0,6 con diámetros de 30 y 71 mm; y relación a/c 0,5, con diámetros 30 y 71 mm, respectivamente.



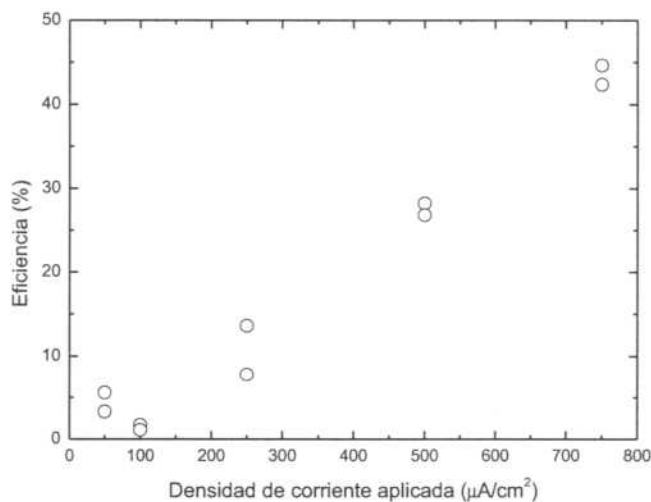
**Figura 4.4:** Eficiencia del proceso corrosivo en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 30 mm de diámetro.



**Figura 4.5:** Eficiencia del proceso corrosivo en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,6 y 71 mm de diámetro.



**Figura 4.6:** Eficiencia del proceso corrosivo en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 30 mm de diámetro.

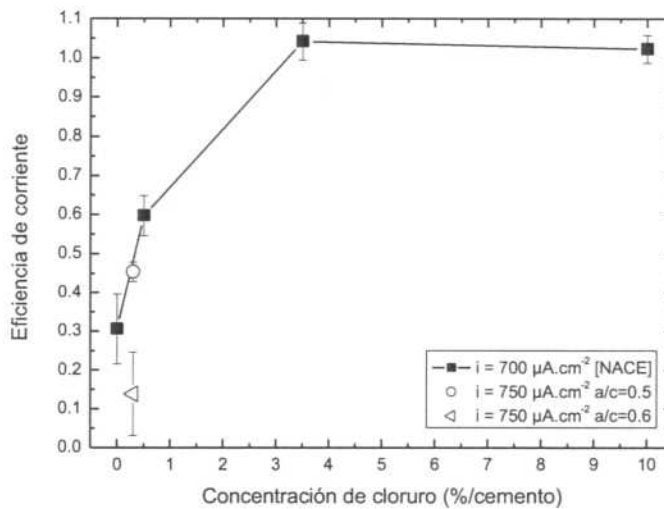


**Figura 4.7:** Eficiencia del proceso corrosivo en función de la densidad de corriente aplicada para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 71 mm de diámetro.

La primera observación destacable a partir de las figuras 4.4 a 4.7, es la escasa reproducibilidad de resultados para ciertas condiciones experimentales. Este hecho no es nuevo, ya que otros autores [9,10,11] habían realizado una observación similar al analizar sus resultados.

En las figuras 4.4 y 4.6 se puede apreciar que para las probetas de menor diámetro y para las dos relaciones a/c empleadas, los valores de eficiencia de corriente se encuentran comprendidos entre 1% y el 77%, siendo estos valores independientes de la densidad de corriente aplicada. En cambio, para las probetas de mayor diámetro (figuras 4.5 y 4.7), los valores de eficiencia muestran cierta tendencia con la densidad de corriente aplicada (a mayor densidad de corriente, mayor eficiencia), con valores entre 1% y 45%.

Esta baja eficiencia de corriente, ya había sido mostrada por Nossoni y Harichandran [1], quienes observaron que esta eficiencia era dependiente, no solo de la densidad de corriente aplicada, sino también del contenido de cloruro en el mortero. La figura 4.8 muestra los valores de eficiencia de corriente obtenidos por dichos autores, en comparación con las obtenidas en el presente trabajo para una densidad de corriente similar. Se puede observar que para la probeta de menor relación a/c, los valores están dentro de los valores obtenidos por Nossoni y Harichandran [1], mientras que para una mayor relación a/c, se obtuvieron eficiencias menores.



**Figura 4.8:** Eficiencia de la corriente en función del contenido de cloruro en el mortero obtenida por [1], y las obtenidas en el presente trabajo para los dos diámetros correspondientes a las dos relaciones a/c ensayadas.

Caré y Raharinaivo [12], también presentan un comportamiento similar en cuanto a que en ensayos acelerados, la corrosión del acero responde a la ley de Faraday únicamente en medios altamente clorados (dando eficiencias de corriente en algunos casos mayores que 100%), indicando que el principal proceso implicado es la disolución del acero. Por el contrario, cuando el medio no contiene cloruros, o lo contiene en bajas concentraciones (como es el caso del presente trabajo), la corrosión acelerada es un proceso más complejo que provee bajas eficiencias en la corriente.

Nossoni y Harichandran [1] postulan que para bajos contenidos de  $\text{Cl}^-$ , la ley de Faraday no puede estimar correctamente la pérdida de masa del metal debido a que ocurren reacciones competitivas en el ánodo, que dependen de varios factores tales como la concentración de  $\text{Cl}^-$  en el sistema, el pH de la solución, y la densidad de corriente aplicada. Estas reacciones competitivas son la oxidación del metal, ecuación [4.1], y la formación de oxígeno debido a la hidrólisis del agua, ecuación 4.2.

El hecho de que la eficiencia de corriente sea menor al 100%, indica que solo una parte de la corriente suministrada al sistema se consume en la oxidación del metal (ecuación 4.1), mientras que el resto de la misma se consume en algún otro proceso anódico, como por ejemplo, la oxidación del electrolito (ecuación 4.2).



Para altas concentraciones de cloruro y cuando no existen limitaciones para el acceso de agua a las probetas de mortero, la eficiencia de la corriente es cercana a la unidad, por lo que la ley de Faraday se puede utilizar para estimar con precisión la pérdida de masa en los ensayos de corrosión acelerada siempre y cuando la densidad de corriente utilizada no sea muy elevada. Algunos autores [1] sugieren que cuando existen barreras físicas que restringen la difusión de agua y de  $\text{Cl}^-$  dentro del mortero, la utilización de la ley de Faraday no proporciona una buena estimación de la pérdida de masa que sufrirá la barra de acero.

Por otro lado, cuando se aplica un campo eléctrico a una barra de acero embebida en mortero, se produce la electrólisis de agua en ambos electrodos (el de trabajo y el contraelectrodo). En estas condiciones, en el ánodo, la evolución de  $O_2$  se produce a expensas del consumo de  $OH^-$  por lo que localmente disminuye el pH en las cercanías de la barra. Esto trae como consecuencia que, la disminución del pH debido a la corrosión acelerada puede generar una disminución de pH tal que sea imposible al acero mantener su pasividad. En presencia de cloruros, esta disminución del pH puede generar corrosión localizada aún cuando el contenido de cloruros esté por debajo del contenido crítico para condiciones naturales.

La acidez generada durante la corrosión inducida por cloruros puede llevar a la disolución de los productos de corrosión formados, los cuales pueden difundir alejándose del área anódica, como se puede ver en la figura 3.20. Cuando los productos de corrosión generados son examinados luego de la rotura de las probetas, estos productos son de color marrón rojizo o negros, típicos productos encontrados durante la corrosión inducida por cloruros. Esto fue confirmado por medio del análisis de dichos productos que dio como resultado la presencia mayoritaria de *akaganeita*, típico producto de corrosión del acero en presencia de cloruro.

La práctica habitual de aplicar una densidad de corriente constante al acero embebido en el hormigón o mortero, para determinar el tiempo de fractura y/o establecer una relación entre la magnitud del ataque y la corriente aplicada, lleva a resultados inciertos debido a la gran cantidad de variables involucradas [9]. Además de la naturaleza de los distintos productos de corrosión formados, el fenómeno global de corrosión y fisuración está influenciado por diversos factores, a saber:

- (a) La velocidad de formación del ion ferroso ( $Fe^{2+}$ ),
- (b) La difusión de  $Fe^{2+}$  hacia el exterior de la probeta,
- (c) La solubilidad de los productos de corrosión formados,
- (d) La concentración de aniones presentes, es decir, la composición química de la fase acuosa en los poros.

Todos estos factores son mutuamente dependientes. Por otro lado, otros factores adicionales influyen al proceso global:

- (e) Ataque localizado sobre fracciones de área menores al 100%
- (f) Penetración no uniforme de la corrosión en las áreas corroídas, donde las picaduras se solapan con zonas de ataque generalizado,
- (g) Transporte preferencial de los productos de corrosión vía macrodefectos que producen puntos de óxido en la cubierta de mortero.

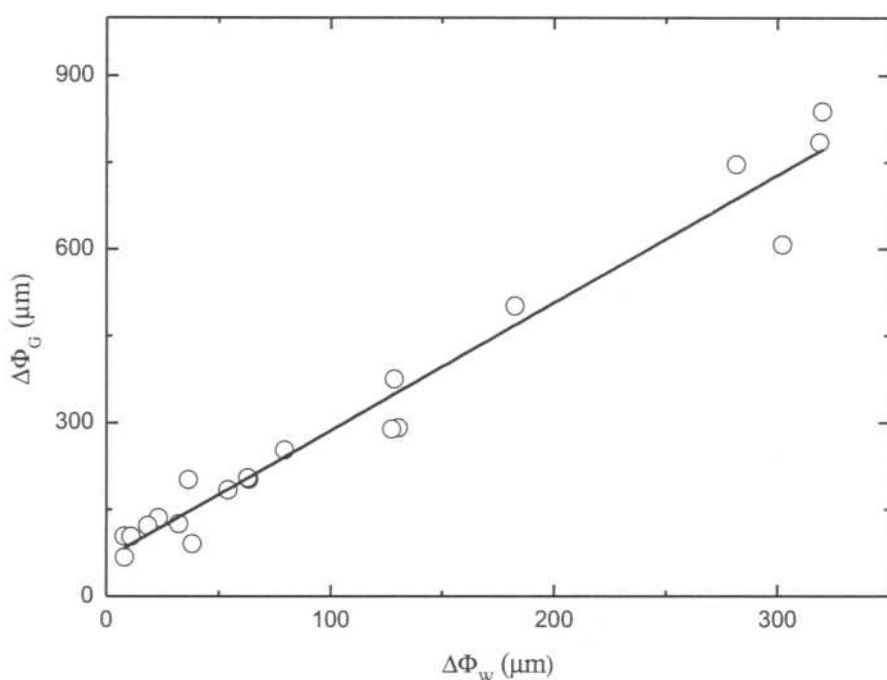
La experiencia muestra que a pesar de la aplicación de una densidad de corriente uniforme, difícilmente se obtenga ataque generalizado. El ataque localizado se solapa con corrosión generalizada favoreciendo la concentración de tensiones en pequeñas áreas, que posteriormente generan fisuración del mortero. Todos estos factores hacen que sea muy difícil predecir o modelar el tiempo de la fisuración de la cubierta de mortero, que es uno de los objetivos primordiales cuando se llevan a cabo ensayos de corrosión acelerada.

### **4.3 Ensayos de gammagrafía**

El análisis de las gammagrafías obtenidas para las diferentes densidades de corriente aplicadas, muestran que, debido al límite de detección de dicha técnica, que en las condiciones experimentales empleadas fue del orden de 92  $\mu\text{m}$ , no fue posible detectar corrosión generalizada debido a que la disminución del diámetro sufrida por las barras de acero fue, en la mayoría de los casos, menor a este límite de detección (ver Tablas 3.2 a 3.5). Sin embargo, la aparición de ataque localizado en forma de picado, permitió la aplicación de esta técnica para medir la profundidad de este tipo de ataque (Tabla 3.1). La figura 4.9 muestra la pérdida de diámetro obtenida a partir de datos gravimétricos, asumiendo corrosión generalizada y los valores de profundidad de corrosión localizada medida por medio de la gammagrafía.

La aplicación de la técnica de cuadrados mínimos a los puntos experimentales genera una recta de coeficiente de correlación 0,96 y de pendiente de aproximadamente 3. Esto

equivale a decir que la profundidad del ataque localizado es casi 3 veces mayor que la profundidad del ataque asumiendo corrosión generalizada (factor de picado). Este resultado es consistente con los obtenidos por González *et al* [13] quienes encontraron que cuando se determina la velocidad de corrosión por técnicas electroquímicas desde el exterior de una estructura, y asumiendo que solo se está produciendo corrosión generalizada, si el sistema está sufriendo corrosión localizada, su velocidad de penetración puede ser tres veces mayor que la predicha por las técnicas electroquímicas.



**Figura 4.9:** Pérdida de diámetro de las barras de acero obtenidas por gravimetría asumiendo corrosión generalizada en función de la profundidad de ataque localizado determinado por gammagrafías.

Las técnicas radiográficas, sean rayos X,  $\gamma$  o neutrones, consisten en la utilización de radiación de muy corta longitud de onda que penetra en el medio y es parcialmente absorbida por el mismo. El nivel de absorción dependerá de la densidad y espesor del material que atraviesan los rayos y de las características de la radiación. Los rayos que



atraviesen el material son detectados en algún tipo de film, papel sensible, pantalla fluorescente o sensores electrónicos [14, 15].

Las técnicas radiográficas son capaces de detectar cualquier tipo de defecto que presente una diferencia en espesor o densidad significativa con el material base, siendo la sensibilidad de la técnica mayor cuanto mayores sean estas diferencias y cuando el defecto sea paralelo a la dirección de los rayos [14].

La gammagrafia industrial es un tipo de ensayo no destructivo que utiliza una fuente radiactiva emisora de rayos gamma con el objeto de examinar el interior de las estructuras sin dañarlas. Requiere de la autorización de la Autoridad Regulatoria Nuclear para su implementación pero es potencialmente menos peligrosa que la utilización de equipos de rayos X, dado que es posible controlar la fuente radiactiva de manera más cuidadosa. Posee la desventaja de que se requiere el acceso a ambos lados de la estructura a analizar cuyo espesor debe ser menor de 60 cm cuando se utilizan fuentes radiactivas de  $\text{Co}^{60}$  (mayor poder de penetración) [16]. Si se compara la gammagrafia con la técnica de rayos X que utiliza un acelerador lineal eléctrico, se desprende que las imágenes gammagráficas tienden a ser más débiles que las obtenidas con los rayos X y que se requieren tiempos de exposición mayores. Por lo tanto, una inspección que demanda 30 minutos usando rayos X de alta potencia, puede demorar varias horas utilizando la técnica de gammagrafia.

La técnica de rayos X, al ser accionado eléctricamente, la emisión de rayos se detiene al accionar un interruptor, en cambio, no es posible detener la emisión de una fuente radiactiva [14]. Tanto la técnica de rayos X, como la de rayos  $\gamma$ , requieren la operación de personal calificado que cuente con la protección adecuada, ya que pueden producir daño a los tejidos vivos con una probabilidad que crece con la intensidad de la irradiación absorbida [17].

Finalmente cabe destacar que la técnica de gammagrafia permite economizar tiempo, mano de obra y costos de reparación, además de no generar polvo ni suciedad.



## Referencias

- [1] G. Nossoni y R. Harichandian, "Current efficiency in accelerated corrosion testing of concrete", *Corrosion* 68(9) 801-809, NACE International (2012).
- [2] M. Manera, Ø. Vennestand y L. Bertolini, "Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume", *Corrosion Science* 50, 554-560 (2008).
- [3] U. Angst, B. Elsener, C. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete-A review, *Cement and Concrete Research* 39, 1122-1138 (2009).
- [4] K.Y. Ann y H.W. Song, "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", *Corrosion Science* 49, 4113-4133 (2007).
- [5] M. Pourbaix, "Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions", NACE International Cebelcor, 2º English Edition (1974).
- [6] M. Pourbaix, "Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice", *Corrosion Science* (14), 25-82 (1974).
- [7] M. Moreno, W. Morris, M.G. Alvarez y G.S. Duffó, "Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions. Effect of carbonation and chloride content", *Corrosion Science*, 46 (11), 2681-2699 (2004).
- [8] M. Pourbaix, "Significance of protection potential in pitting and intergranular corrosion", *Corrosion* 26(10), 431-438, NACE International (1970).
- [9] J.A. González, S. Feliu y P. Rodríguez, "Threshold steel corrosion rates for durability problems in reinforced structures", *Corrosion* 53(1), 65-71, NACE International (1997).



[10] T.A. El Maaddawy y K.A. Soudki, “Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(1), 41-47, (2003).

[11] S.A. Austin, R. Lyons y M.J. Ing, “Electrochemical behavior of steel-reinforced concrete during accelerated corrosion testing”, *Corrosion* 60(2), 203-212, NACE International (2004).

[12] S. Caré y A. Raharinaivo, “Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel”, *Cement and Concrete Research*, 37, 1598-1612 (2007).

[13] J.A. González, C. Andrade, C. Alonso y S. Feliu, “Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration of concrete embedded steel reinforcement”, *Cement and Concrete Research* 25(2), 257-264, (1995).

[14] D.M. McCann y M.C. Forde, “Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures”, *NDT&E International* 34, 71-84 (2001).

[15] X. Dérobert, C. Aubagnac y O. Abraham, “Comparison of NDT technique on a post-tensioned beam before its autopsy”, *NDT&E International* 35, 541-548 (2002).

[16] B. Redmer, F. Weise y U. Ewert, “Location of reinforcement in structures by different methods of gamma-radiography”, *International Symposium of Non-Destructive testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003)*, 16-19 de Septiembre Berlín, Alemania (2003).

[17] Tomografía de Hormigón Armado S.A., [www.thasa.com](http://www.thasa.com) (Consultado: 30 de Abril de 2012).

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

- Durante la corrosión acelerada de barras de acero embebidas en mortero, la eficiencia de corriente es menor al 100%, debido a la producción de reacciones anódicas diferentes a la oxidación del hierro, siendo la más probable la oxidación del agua.
- La eficiencia de corriente no guarda una relación clara ni con la densidad de corriente aplicada durante la corrosión acelerada, ni con la relación agua/cemento empleada, ni con el espesor de recubrimiento de las probetas.
- El contenido de cloruro presente en el cemento, más la cantidad proveniente de la arena, es suficiente para generar corrosión localizada del acero embebido en el mortero, y este hecho queda justificado al analizar el diagrama de Pourbaix para el sistema  $\text{Fe}/\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{O}$ .
- El producto de corrosión mayoritario encontrado (*akaganeita*) y la presencia de picaduras sobre la superficie de las barras, son consistentes con el contenido de cloruro del mortero empleado.
- Las probetas de menor diámetro se fisuraron antes y con una menor densidad de corriente que las probetas de mayor diámetro.
- La técnica de gammagrafía ha resultado ser adecuada para la determinación de corrosión en barras de acero embebidas en material cementíceo. En las condiciones experimentales del presente trabajo tiene un límite de detección de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , lo que la hace apta para la determinación de la profundidad de ataque generada por la corrosión localizada.
- Por medio de la aplicación de dos técnicas distintas, como lo son los ensayos electroquímicos y la gammagrafía, se pudo establecer que la relación existente entre la profundidad del ataque localizado y el ataque generalizado es del orden de 3.
- La aplicación de la técnica de corriente impresa para simular el efecto de la corrosión sobre el acero embebido en materiales cementíceos es adecuada para disminuir el tiempo de duración de los ensayos cuando se trata de determinar el efecto



de las diversas variables sobre el tiempo de fractura del espécimen. Sin embargo, los aspectos electroquímicos involucrados parecen diferir enormemente a los encontrados en corrosión natural ya que en estos casos, si es factible obtener relaciones entre el daño causado por la densidad de corriente de corrosión y las diferentes variables experimentales involucradas (por ejemplo, relación a/c o espesor de recubrimiento).