



1. Introducción

El gran desarrollo de la construcción en los últimos 50 años se ha basado principalmente en la utilización del hormigón armado y pretensado, el cual debido a sus propiedades de durabilidad y rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista del sector, siendo utilizado tanto para edificaciones como para obra pública. La combinación del hormigón y acero ofrece magníficas prestaciones en cuanto a resistencias mecánicas

Hasta hace algunos años se consideraba que un hormigón armado bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo físico, químico o mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezca todo tipo de patologías asociadas.

El principal problema del hormigón armado es la corrosión de las armaduras embebidas en él, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones y siendo causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras. Las armaduras embebidas en el hormigón están protegidas por una capa protectora de óxidos que las recubre permanentemente, manteniéndolas inalteradas por tiempo indefinido. La corrosión se inicia cuando penetran en el hormigón agentes contaminantes que rompen esta capa protectora. El desencadenamiento de la corrosión puede ser bien la carbonatación del hormigón o bien la penetración de cloruros procedentes de las sales de deshielo o del rocío marino que tienden a destruir la capa pasivante (*Andrade, 1989*).

Para que se produzca la despasivación del acero es preciso que las concentraciones de cloruros en las inmediaciones de las barras de acero superen unos valores mínimos. Por ello para poder evaluar la duración del período de iniciación de la corrosión por cloruros (*Tuutti, 1982*) es preciso conocer los mecanismos y la velocidad de ingreso de Cl^- en el hormigón expuesto a medios salinos. Por otra parte se sabe que una parte de los Cl^- que penetran en la estructura del hormigón son fijados por los compuestos sólidos hidratados del mismo. Por ejemplo, el aluminato tricálcico puede formar el monocloroaluminato cálcico hidratado o “sal de Friedel” ($\text{C}_3\text{AH}_6 \cdot \text{CaCl}_2$), entre otros compuestos. Por ello solamente los cloruros libres en la red de poros del hormigón (no combinados) son relevantes desde el punto de vista de la corrosión de armaduras.

La corrosión se podría evitar dejando un gran recubrimiento del acero o utilizando hormigones con una relación agua/ cemento baja, así la profundidad de penetración de cloruro sería también baja. Sin embargo, la corrosión ocurre con frecuencia puesto que este recubrimiento suele ser insuficiente y la mayoría de veces se utilizan hormigones muy porosos.

En la actualidad, muchas estructuras de hormigón armado con apenas 10 o 20 años de servicio tienen que ser reparadas debido a la corrosión, dando lugar a grandes pérdidas económicas. Por ello, se trata de un tema de máxima actualidad como lo demuestra el que cada día sea mayor el número de tratamientos de reparación y prevención que se están realizando.

Para reparar los daños producidos es necesario determinar las causas que han provocado la corrosión y eliminarlas, o reducirlas, para que no se vuelva a corroer el acero.

Las reparaciones tradicionales consisten en eliminar el hormigón contaminado por cloruros, limpiar el refuerzo de la zona contaminada y posterior reposición del hormigón eliminado. Pero esta técnica tiene muchos inconvenientes como realización de trabajos muy laboriosos, ruido, suciedad, y un costo en reparaciones muy alto.

Una solución alternativa, si el hormigón está contaminado, pero la corrosión no se encuentra muy avanzada, es la técnica de extracción electroquímica de cloruros. Con esta técnica no es necesario sustituir el hormigón dañado, y una vez extraída una cantidad suficiente de cloruros se restablecería la protección de las armaduras.

1.1. Hormigón

El hormigón es un material de construcción que se obtiene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava. De la distinta mezcla de estas materias primas se obtienen también otros materiales de construcción afines:

Pasta de cemento: Proviene de la mezcla de agua y cemento.

Mortero: Proviene de la mezcla de agua, cemento y arena.

Hormigón: Proviene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava.

A estos materiales, en el momento de su amasado, se les puede añadir otros productos para mejorar algunas características determinadas.

El que al hormigón se le considere hoy como el rey universal de los materiales de construcción se debe a sus indiscutibles ventajas (*Fernández Cánovas, 1993*):

1. Es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma, debido al carácter plástico que posee en estado fresco.
2. Posee elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posea menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero en su interior.
3. Proporciona piezas de gran monolitismo, prescindiendo de juntas o uniones, que suelen ser zonas débiles. Desde este punto de vista es mejor que las construcciones pétreas, de ladrillo o de acero laminado.
4. Está formado por materiales abundantes y baratos.

Pero no todo son ventajas en el hormigón, pues a este material se le pueden poner serios inconvenientes:

5. Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada.

6. Presenta anisotropía (por ejemplo, en su resistencia mecánica).
7. Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo físico como químico.

1.1.1. Composición del cemento Portland

1.1.1.1. Materias Primas

El cemento Portland está formado básicamente por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción, hasta sinterización, de una mezcla de caliza y arcilla, que recibe el nombre de clinker y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente, es yeso dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Fernández Cánovas, 1993). La fabricación del cemento Portland se esquematiza en la figura 1.1. El clinker, componente básico del cemento, está formado por una mezcla de silicatos, aluminato y ferrito aluminato de cal, esto hace que en la composición de las materias primas que van a formar el crudo, es decir, el material que se cuece en el horno, han de estar los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en proporciones muy concretas. Acompañando a estos óxidos aparecen en las materias primas otros que no son tan deseables a pesar de estar en menores proporciones. Son los de magnesio, sodio, potasio y otros. Estos óxidos suelen designarse y representarse de forma abreviada de acuerdo a las indicaciones de la tabla 1.1.

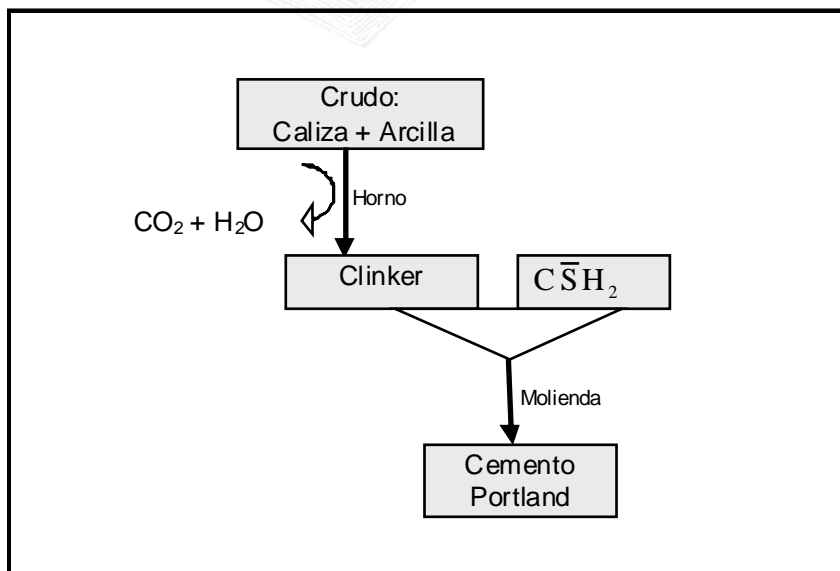


Figura 1.1. Fabricación del cemento Portland.

Los límites aproximados entre los que oscila la composición en óxidos de un cemento Portland son los que figuran en la tabla 1.2. Los cuatro primeros óxidos dan lugar a los componentes activos o principales del cemento Portland mientras que los restantes se consideran como componentes secundarios o no deseables.

Nombre	Óxido	P.M. (g/mol)	Abreviatura
Cal	CaO	56	C
Sílice	SiO ₂	60	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	102	A
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	160	F
Agua	H ₂ O	18	H
Trióxido de azufre*	SO ₃	80	\bar{S}
Dióxido de carbono**	CO ₂	44	\bar{C}
Magnesia	MgO	40	M
Óxido de sodio	Na ₂ O	62	N
Óxido de potasio	K ₂ O	94	K

*Nunca se encuentra como tal, sino combinado como por ejemplo en el yeso añadido como regulador de fraguado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$

**Nunca se encuentra como tal, sino combinado como por ejemplo en el carbonato cálcico formado tras la carbonatación del cemento $\text{CaCO}_3 = \text{C}\bar{\text{C}}$.

Tabla 1.1. Nomenclatura abreviada de los óxidos que componen el cemento Pórtland.

1.1.1.2. Componentes del clinker Portland

Los componentes minerales principales o activos del clinker son (*Fernández Cánovas, 1993*) los que aparecen representados en la tabla 1.3. Estos están formados por la composición de dos o más óxidos principales y forman cristales mixtos en los que entran compuestos de otras fases en cantidades reducidas. Los componentes principales se encuentran en el clinker en estado cristalino aunque no en su totalidad pues de un 2 a un 12% de ellos se encuentra en fase amorfa.

De los cuatro componentes principales del clinker, los silicatos suman del 60 al 80% de ellos y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. Estos componentes son:

Silicato tricálcico (C₃S) o alita: Este componente se puede considerar como el principal o decisivo del clinker, confiriendo altas resistencias iniciales al hormigón.

Silicato bicálcico (C₂S) o belita: Este componente, que es metaestable, da pocas resistencias en los primeros días pero luego las va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al silicato tricálcico. Durante el enfriamiento parte del silicato se transforma en la forma metaestable $\beta\text{-C}_2\text{S}$ y si el enfriamiento es lento esta variedad se transforma en la estable $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ que es hidráulicamente inactiva.

Óxido	Contenido (% en peso)
C	60-67
S	17-25
A	3-8
F	0.5-6
M	0.1-4
N+K	0.4-1.3
S	0.1-2.5
TiO ₂	0-0.5
Mn ₂ O ₃	0-0.3

Tabla 1.2. Composición en óxidos del cemento Portland.

Nombre	Composición	P.M. (g/mol)	Calor de hidratación (cal/g)	Fórmula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	3CaO·SiO ₂	228	120	C ₃ S	Alita
Silicato bicálcico	2CaO·SiO ₂	172	60	C ₂ S	Belita
Aluminato tricálcico	3CaO·Al ₂ O ₃	270	207	C ₃ A	Felita
Ferrito aluminato tetracálcico	4CaO Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	486	100	C ₄ AF	Celita

Tabla 1.3. Principales componentes minerales del cemento Portland.

Aluminato tricálcico (C₃A) o felita: Este componente por sí solo contribuye muy poco a la resistencia del cemento pero, en presencia de los silicatos, desarrolla unas resistencias iniciales buenas. Su hidratación es rapidísima al tomar contacto con el agua. Para retrasar su actividad se utiliza el yeso que actúa como regulador de fraguado. Hay que tener también presente que los clinkeres que poseen un contenido alto de aluminato tricálcico dan lugar a pastas, morteros y hormigones muy sensibles al ataque por sulfatos y otros agresivos. No obstante, este componente tiene la capacidad de fijar al cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión de las armaduras.

Ferrito aluminato tetracálcico (C₄AF) o celita: Apenas tiene importancia en la resistencia del cemento. El óxido de hierro tiene la finalidad de actuar como fundente durante la cocción del crudo.

La composición en componentes principales de un cemento se puede estimar a partir de su composición en óxidos. Es lo que se conoce como composición potencial de Bogue.

Los otros componentes que forman parte del clinker se consideran como secundarios. Aunque entran en reducidas proporciones en la composición del clinker no por eso dejan de tener importancia debido a los efectos negativos a que pueden dar lugar. Estos componentes secundarios son fundamentalmente:

Cal libre (CaO) y óxido de magnesio (MgO): Su hidratación es expansiva pudiendo dar lugar a fisuras superficiales en el hormigón e incluso al debilitamiento y destrucción del mismo.

Álcalis (K₂O y Na₂O): Pueden presentar varios problemas. Destacamos la reacción expansiva que pueden tener con determinados áridos silíceos (reacción árido-álcali, véase apartado 1.1.5.1).

1.1.2. Hidratación del cemento Portland

Cuando se mezcla el cemento Portland con agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido (*Fernández Cánovas, 1993*). A este proceso se le conoce como *fraguado*.

Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado. De ahí la importancia de mantener un ambiente de elevada humedad después del fraguado. A este tratamiento se le llama *curado*. Durante el curado va aumentando progresivamente la resistencia mecánica del hormigón al ir precipitando sus componentes hidratados.

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

Silicato tricálcico: Reacciona rápidamente con el agua produciéndose *silicatos cálcicos hidratados* C₃S₂H₃ y *portlandita* CH:



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

Silicato bicálcico: Reacciona más lentamente según:



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



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



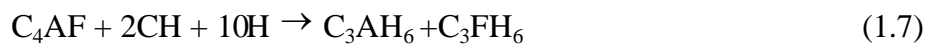
Los aluminatos cúbicos son menos voluminosos que los hexagonales debido a la pérdida de agua. Esto hace que esta conversión venga acompañada de una disminución del volumen ocupado por los sólidos en el hormigón y por tanto una pérdida de compacidad, aumento de la porosidad y disminución de las resistencias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

La reacción del C_3A con el agua es muy rápida, dando lugar a un endurecimiento rápido de la pasta conocido como *fraguado relámpago* (Fernández Cánovas, 1993). Para evitarlo y hacer la mezcla trabajable se añade al clinker un regulador de fraguado que normalmente es yeso dihidrato ($C\bar{S}H_2$). El yeso y el aluminato reaccionan para formar sulfoaluminato cálcico hidratado insoluble, también conocido como *ettringita o sal de Candlot*, que bloquea superficialmente las partículas de C_3A impidiendo su hidratación a una velocidad excesiva:



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

Ferrito aluminato tetracálcico: Produce aluminatos cálcicos y ferritos cálcicos:



Óxidos de calcio y magnesio libres: La formación de sus productos hidratados da lugar a un aumento de volumen:



1.1.3. Tipos de cementos

Además del cemento Portland descrito en los apartados anteriores existen otros tipos de cementos (Fernández Cánovas, 1993). Todos ellos, excepto el cemento de aluminato de calcio, consisten en modificaciones del cemento Portland para proporcionarle determinadas características. Estos cementos son:

Cementos puzolánicos: Proviene de la mezcla de clinker de cemento Portland y puzolanas, que son materias de naturaleza silíceas o aluminosas, naturales o artificiales, que mejoran la resistencia química frente a determinados agresivos.

Cementos siderúrgicos: Proviene de la mezcla de clinker de cemento Portland y escorias de alto horno. Tienen características especiales que los hacen adecuados en determinadas aplicaciones.

Cemento blanco: Consiste en cemento Portland con bajo contenido en óxido férrico. Este es el responsable de la coloración del cemento, por lo que con su ausencia se consiguen cementos de color blanco. La preparación de estos cementos requiere mayor temperatura durante la cocción, ya que el óxido férrico actúa como fundente. La utilidad de estos cementos es de tipo estético, pudiéndose colorear con distintos aditivos.

Cementos de bajo calor de hidratación: Son cementos Portland con bajos contenidos en C_3S y C_3A . Esto les confiere un menor calor de hidratación (véase la tabla 1.3). La utilización de estos cementos es importante cuando se trabaja con grandes cantidades de hormigón (construcción de presas, etc.).

Cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar: Son cementos Portland con bajo contenido en C_3A y C_4AF , para evitar los efectos perniciosos de los sulfatos (véase apartado 1.1.5.1.).

Cemento de aluminato de calcio: Este tipo de cemento forma un conglomerante totalmente diferente al Portland, no sólo por la naturaleza de las materias primas y el proceso de fabricación, sino, también, por sus características entre las que cabe destacar sus altas resistencias iniciales, su carácter refractario y el ser más expansivo que los cementos Portland. Se obtiene de la cocción de bauxita y caliza.

Cementos sin retracción: Son aquellos que, una vez mezclados con el agua, forman una pasta que después de fraguar aumenta de volumen de tal forma que compensa la retracción e incluso, llega a crear una expansión que genera compresiones en el hormigón. Estos cementos están basados en la formación controlada de ettringita.

1.1.4. Composición de la disolución interna de los poros del hormigón

En el amasado del hormigón es necesario añadir una cantidad de agua superior a la necesaria para formar los cristales hidratados de los aluminatos y silicatos del cemento. Este exceso de agua se añade para obtener una pasta plástica y trabajable. Tras el fraguado, el agua sobrante queda atrapada en el interior de la masa, formando una red de poros y capilares (*Andrade, 1998*). Las burbujas de aire ocluido también participan en la formación de esta red de poros, cuyos tamaños varían desde pocos nanómetros (microporos) a micrómetros (capilares) o incluso milímetros (grandes poros o poros de aire). Estos poros pueden estar interconectados entre sí (porosidad abierta) o no (poros cerrados).

Las complejas reacciones que tienen lugar durante la hidratación del cemento, en la que se forman nuevas fases sólidas como especies solubles, dan lugar a una compleja

disolución acuosa encerrada en la red de poros. El conocimiento de la composición de esta disolución es fundamental para la comprensión de los procesos químicos que se dan en el hormigón. Desgraciadamente la determinación experimental de esta composición tropieza con el problema de la accesibilidad de la disolución.

La mejor técnica disponible hoy en día para analizar dicha disolución es la conocida como *pore solution expression o pore pressing* (Longuet, 1973. Haque, 1995). Esta se basa en la aplicación, mediante una prensa hidráulica, de enormes presiones (300-500 MPa) a la muestra de hormigón. Se produce en primer lugar la rotura de la muestra, seguida de la consolidación de los fragmentos y, por último, la exudación de la disolución contenida en la red de poros del hormigón. Esta es recogida y analizada mediante los métodos convenientes.

El análisis de esta disolución (Longuet, 1973, Byfors, 1986; Tritthart, 1989; 1992, Page, 1991) muestra, si bien no existe un claro acuerdo entre los distintos autores (Diamond, 1986, Atkins, 1996), que está formada principalmente por hidróxidos alcalinos (KOH sobre todo y en menor cantidad NaOH). Existen también otras especies en menor concentración: SO_4^{2-} , Ca^{2+} , AlO_2^- , (Longuet, 1973, Barneyback, 1981).

La concentración de ion hidróxido encontrada en pastas de cemento Portland es alta, variando desde 0.1 M a 0.7 M (Longuet, 1973; Barneyback, 1981; Byfors, 1986; Tritthart, 1989; Tritthart, 1992; Page, 1991), mientras que las pastas de cementos con adiciones suelen proporcionar menores concentraciones de OH^- , variando entre 0.04M y 0.3 M (Page, 1991; Haque, 1995; Maslehuddin, 1996). La contaminación con cloruro sódico provoca un aumento de la concentración de OH^- (Page, 1991; Haque, 1995, Maslehuddin, 1996), llegando a valores de 0.4 M a 0.55 M en ciertos morteros de cemento Portland contaminados con Cl^- (Maslehuddin, 1996).

1.1.5. Durabilidad de las estructuras de hormigón armado

Cuando el hormigón armado empezó a ser utilizado en la fabricación de estructuras se pensó que su durabilidad era ilimitada debido a que su apariencia es la de un pétreo, y a la doble protección que reciben las armaduras embebidas en él: por un lado la barrera física que aporta el recubrimiento, y por otro la protección química proporcionada por la alcalinidad del cemento.

Aunque el hormigón tiene la apariencia de ser un material denso y pétreo, es un material poroso que permite la entrada de los líquidos y los gases procedentes del exterior, y su transporte por la red interna de poros.

La porosidad adquirida por el hormigón es debida al exceso de agua necesario en el amasado para hacer trabajable la mezcla y para conseguir una buena hidratación del cemento. Cuando se produce el fraguado, el agua sobrante que contiene el hormigón puede quedar en el interior del mismo o bien evaporarse, dejando una red de canalículos variados en tamaño. Esta red de poros supone un camino por el cual los agentes externos pueden llegar a dañar tanto al propio hormigón como a la armadura. Además de forma aproximada, podemos decir que la resistencia del hormigón es inversamente

proporcional a su porosidad. El volumen total de poros depende, fundamentalmente, de la relación a/c. Cualquier reducción de dicha relación mediante el uso de mezclas y granulometrías adecuadas, o agentes fluidificantes va a repercutir directamente en un aumento de las resistencias mecánicas y de la impermeabilidad.

Por otra parte, el hecho de que el cemento aporte un alto grado de alcalinidad, supone que el hormigón sea un material predispuesto a reaccionar con todos los agentes con carácter ácido que provengan del exterior.

La interacción entre el hormigón y el medio ambiente es el principal factor de deterioro de estas estructuras. El desconocimiento del comportamiento de la estructura frente al grado de agresividad del medio donde está ubicada y de los mecanismos de ataque de los agentes agresivos eran las principales causas de que no se tomaran las medidas adecuadas de protección. Actualmente la preocupación por la durabilidad de las estructuras es mayor, y los estudios que se realizan al respecto se han incrementado en gran número.

El principal agente agresivo para el hormigón es el agua, ya que es el vehículo de transporte de todos los agentes agresivos al interior del hormigón. Dichos agentes pueden ser clasificados en tres categorías: agentes químicos, físicos y biológicos. Los deterioros que pueden ocasionar en el hormigón en función del tipo de agente agresivo son:

Químicos	Deslavado/Lixiviación Ácidos Sulfatos Agua de mar Reacción Árido-Álcali Sales Amónicas y Magnésicas
Físicos	Fisuración Hielo-Deshielo Recristalización de Sales Erosión Cambios de Temperatura
Biológicos	Bacterias

Tabla 1.4. Deterioros en el hormigón en función del tipo de agente agresivo.

1.1.5.1. Ataque por agentes químicos

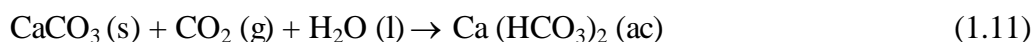
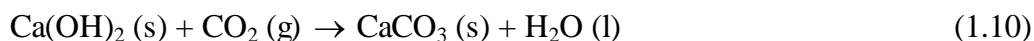
- **Deslavado/Lixiviación:**

Consiste en la descalcificación de las fases del cemento por efecto de un lavado continuo con aguas puras o carbónicas. Esta descalcificación lleva a la disgregación de la pasta, al desmoronamiento del conjunto y a la formación de eflorescencias superficiales.

- **Ácidos:**

Al ser el hormigón un material de naturaleza alcalina, los ácidos reaccionan con los hidróxidos (cálcico, sódico y potásico) para formar sales y agua. Cabe destacar la acción de los gases de carácter ácido presentes en ambientes urbanos e industriales como

el CO₂ y los distintos óxidos de azufre y nitrógeno. En el caso del CO₂ se pueden dar fenómenos de disolución y precipitación dada la solubilidad de los bicarbonatos



No obstante en las condiciones de exposición naturales, la única reacción que se da en el hormigón es la primera, conocida como reacción de carbonatación, y que tiene como consecuencia una disminución de la basicidad del hormigón, detectable mediante el ensayo de la fenolftaleína, y que puede despasivar las armaduras de acero embebidas.

- **Sulfatos:**

La reacción básica consiste en la formación de ettringita (C₃AH₃23C $\bar{\text{S}}$) a partir de la reacción de los iones sulfato con los aluminatos del cemento. Este compuesto es muy expansivo por lo que se produce la disgregación de toda la masa con pérdidas de resistencia muy notables. Una forma de evitar este fenómeno es mediante el uso de cementos con bajo contenido en aluminatos o cementos de adición.

- **Agua de mar:**

Contiene sulfatos, ion magnesio, cloruro sódico y otros componentes de menor importancia en lo que al ataque al hormigón se refiere. Los cloruros rebajan la agresividad de los sulfatos y el magnesio precipita como hidróxido, pudiendo colmatar los poros impermeabilizando así al hormigón. Pero a pesar de esto, las acciones que se producen son de elevada importancia, tales como: deslavado, recubrimientos, formación de la sal de Friedel con la expansión que conlleva, etc.

Una manera de paliar estas acciones es mediante el uso de cemento Portland resistente al agua de mar.

- **Reacción árido-álcali:**

Este tipo de ataque consiste en la reacción de los álcalis del cemento (hidróxidos de sodio y potasio) con algunos tipos de áridos que contienen sílice pobremente cristalizada o amorfa, formándose silicatos (geles) expansivos que absorben agua provocando el desmoronamiento del hormigón.

Las medidas preventivas son el uso de cementos con un contenido en óxido de sodio equivalente menor al 0,6%, y mediante la adición de puzolanas.

- **Sales amoniacales y magnésicas:**

Las sales de magnesio o amoniacales reaccionan con el hidróxido cálcico dando sales cálcicas solubles, produciendo la descalcificación del hormigón.

La protección consiste en el uso de recubrimientos impermeabilizantes.

1.1.5.2. Ataque por agentes físicos

- **Fisuración. Cambios de temperatura**

Debido a cambios de temperatura bruscos durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, si no se ha previsto la existencia de juntas de dilatación, el hormigón puede sufrir elevadas retracciones produciéndose fisuras.

Este efecto puede verse minimizado con la utilización de cementos con calores de hidratación adecuados a la geometría de la pieza y por medio de un buen curado.

- **Hielo-Deshielo**

Este fenómeno se produce en lugares de climas fríos, donde las heladas son abundantes y juegan un papel a tener en cuenta. Este ataque provoca el desmoronamiento superficial del hormigón, disminuyendo de esa forma los recubrimientos dados a los redondos de acero.

Pueden evitarse con el uso de inclusores de aire que, con las burbujas aisladas que introducen en el hormigón aíslan la red capilar, haciendo así un hormigón más impermeable y capaz de resistir las tensiones causadas por la formación de hielo

- **Erosión**

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

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

- **Recristalización de sales**

Este fenómeno tiene consecuencias similares a las de hielo-deshielo, al producirse un aumento de volumen de los cristales formados respecto a los anteriores. Además da lugar a eflorescencias superficiales.

1.1.5.3. Ataque por agentes biológicos

Este tipo de ataque tiene lugar al generarse a partir de bacterias, proteínas, etc., compuestos de azufre o compuestos ácidos que atacarán al hormigón.

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

1.2. Corrosión de armaduras

A pesar de la variedad de procesos nocivos para el hormigón descritos anteriormente, el problema más importante para las estructuras mixtas hormigón-acero es la corrosión de las armaduras de acero embebidas en el hormigón. Esta supone un elevado coste económico. En un estudio realizado sobre los daños ocasionados por la corrosión de armaduras, cabe destacar que más del 40% de los puentes de autopista de USA son deficientes estructuralmente u obsoletos funcionalmente. El coste de las reparaciones y sustituciones se estima en 70 000 millones de dólares USA, siendo aproximadamente el 20% de los costes debidos a la corrosión de las armaduras, por el empleo de sales de deshielo (*Liu, 1998*).

Afortunadamente, los costes por este concepto son inferiores en España, gracias a la climatología menos extrema, (*Andrade, 1991*), cifrándose en 200 000 millones de pesetas anualmente (*Martinez, 1998*).

De la encuesta sobre patología elaborada por el Grupo Español del Hormigón en 1992 se refleja que el 15% de las manifestaciones de daño se deben a problemas de corrosión de armaduras. La mayoría de los casos se han dado en ambientes de humedad media o alta y en ambientes urbanos o marinos. El coste de la reparación ha sido de un valor medio, comparado con el coste debido a la reparación de otra serie de daños, si bien en el 6% de los casos hubo de proceder a la demolición de la estructura. Finalmente, el 67.6% de los casos se han dado en edificios de más de 10 años (*Grupo Español del Hormigón, 1992*).

1.2.1. Fundamentos sobre corrosión de armaduras

Se entiende por corrosión a la reacción de un metal o aleación con el medio. Por este proceso los metales pasan de su estado elemental, a su estado combinado de origen que presentan en la naturaleza, formando compuestos con otros elementos, como óxidos, sulfuros, etc. El proceso mediante el cual el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía de Gibbs, y se produce mediante una reacción espontánea. Este último proceso, que se trata de una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina del metal.

Si la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuoso, se trata de un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, se produce una reacción de oxidación y otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. De esta manera, en la superficie del metal se generan dos zonas, una de ellas actuará de ánodo y ahí tendrá lugar la oxidación del metal,



liberando electrones, que emigran a través del metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. En medios ácidos, esta sustancia será los iones hidrógeno,



y en medios alcalinos y neutros se trata del oxígeno disuelto en el agua,



El proceso de corrosión da lugar a la formación de una pila electroquímica, como muestra la figura 1.2. La circulación de cargas eléctricas a través del metal y del electrolito entre el ánodo y el cátodo funciona como un circuito cerrado, de tal manera, que si el circuito se interrumpe en alguno de sus puntos, la pila deja de funcionar y la corrosión se detiene. (*Evans, 1932; Wagner 1938*).

La oxidación de cada metal se produce de forma diferente, ya que hay unos que tienen más tendencia a oxidarse que otros. Hay algunos metales llamados “metales nobles” que pueden conservarse indefinidamente en su forma elemental.

Como la corrosión tiene lugar en un medio acuoso, se pueden originar iones en disolución que intervienen en reacciones de equilibrio con otros iones del medio, incluidos los del agua. La reacción de corrosión depende de una serie de reacciones en las que intervienen, directa o indirectamente, los iones del agua, por tanto, dependen del pH del medio. Como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación en términos de pH, los cuales se representan gráficamente en diagramas de E-pH, conocidos como diagramas de Pourbaix (Figura 1.3.)

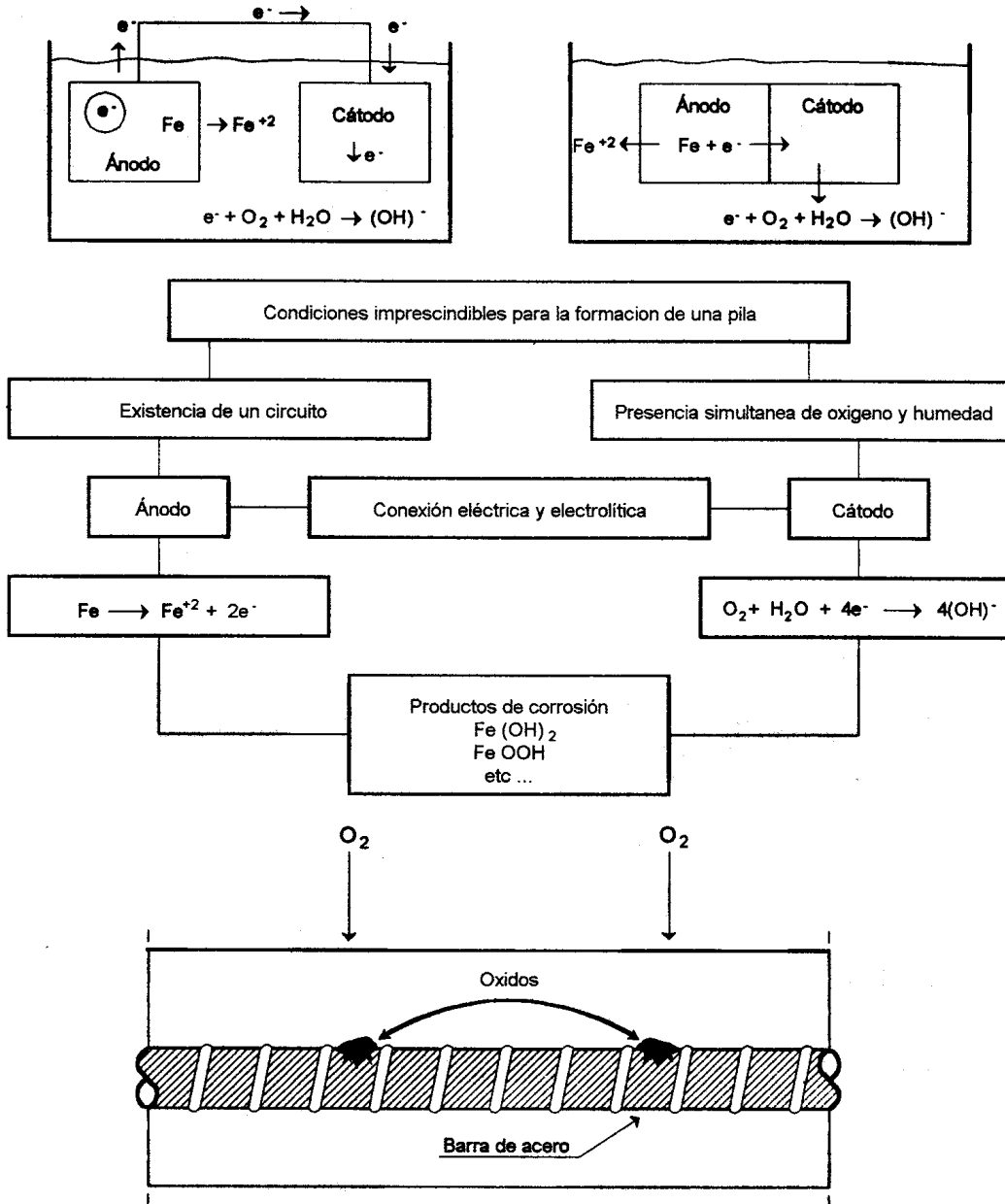


Figura 1.2. Formación de una pila electroquímica.

Los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune.

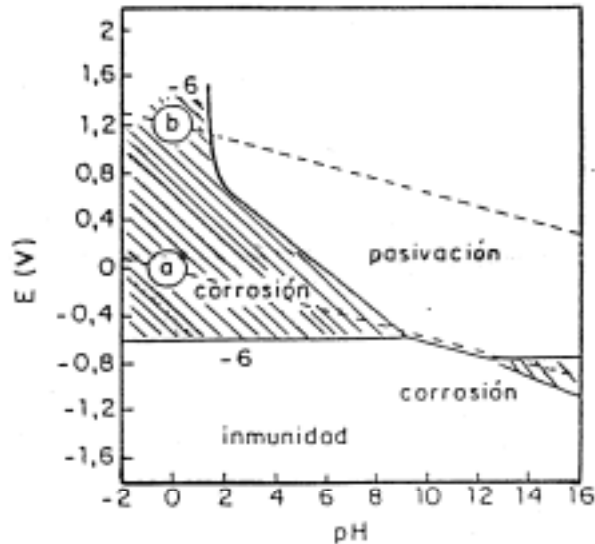


Figura 1.3. Diagrama de Pourbaix para el Fe a 25 °C.

En el estado que se conoce como de “pasividad”, el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa como de barrera impidiendo la posterior oxidación. En el estado de “inmunidad”, el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

También es conveniente destacar que no sólo es necesario considerar si un metal dado se corroe o no, sino también la velocidad a la que lo hace, ya que, la corrosión puede tener lugar tan lentamente que a efectos de vida útil sea despreciable. En la cinética del proceso corrosivo influye fundamentalmente la naturaleza del electrolito, el contenido en oxígeno, la temperatura y la resistividad del medio.

1.2.2. Causas de la corrosión de las armaduras

El hormigón armado es un material compuesto por una mezcla de cemento, áridos, agua, aditivos y acero. El cemento, en presencia de agua se endurece al producirse la hidratación de sus componentes. Se forma un conglomerado sólido, constituido por las fases hidratadas del cemento y una fase acuosa que proviene del exceso de agua de amasado necesaria para que se produzca una correcta mezcla de todos sus componentes. En estas condiciones, el hormigón es un sólido compacto y denso, pero también poroso.

Al producirse el fraguado, parte del agua que no se ha utilizado para la hidratación del cemento se evapora, dando lugar a la formación de una red de poros, que se distribuyen por todo el volumen de hormigón. Esta red de poros hace que el hormigón presente una cierta permeabilidad a los líquidos y gases procedentes del exterior, y que se mueven por toda la red interna de poros, llegando incluso hasta el acero. Por tanto, el volumen de poros dependerá de la relación agua/ cemento, de tal manera que, cuanto mayor sea ésta, mayor será la porosidad.

A la misma vez que se produce la hidratación del cemento, se forma hidróxido cálcico e hidróxidos alcalinos que son los encargados de situar el pH de la fase acuosa contenida en los poros en el extremo más alcalino de la escala de pH, con valores comprendidos entre 12,5 y 14. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra pasivado, es decir, recubierto de una capa de óxidos transparentes, compacta y continua que lo mantiene protegido por períodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el hormigón.

Las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero son fundamentalmente dos:

La presencia de iones despasivantes, esencialmente cloruros, que o bien se añaden durante el amasado o bien penetran desde el exterior, superando un determinado umbral denominado crítico, necesario para romper localmente las capas pasivantes.

La carbonatación del hormigón, es decir, la reacción del dióxido de carbono de la atmósfera con las sustancias alcalinas de la solución de poros y con los componentes hidratados del hormigón, produciéndose la disminución del pH del hormigón por debajo de un valor crítico, no bien definido, que algunos autores sitúan en 9.5 (*Bonnet, 1976*).

Sin embargo, existen otros factores condicionantes que son los encargados de acelerar la velocidad de corrosión al actuar junto con los factores desencadenantes. Los factores condicionantes principales son la presencia de oxígeno y de humedad. Sin la presencia de oxígeno y humedad resulta imposible la corrosión electroquímica y sin una cantidad mínima, ésta no puede desarrollarse a velocidades apreciables (Figura 1.4).

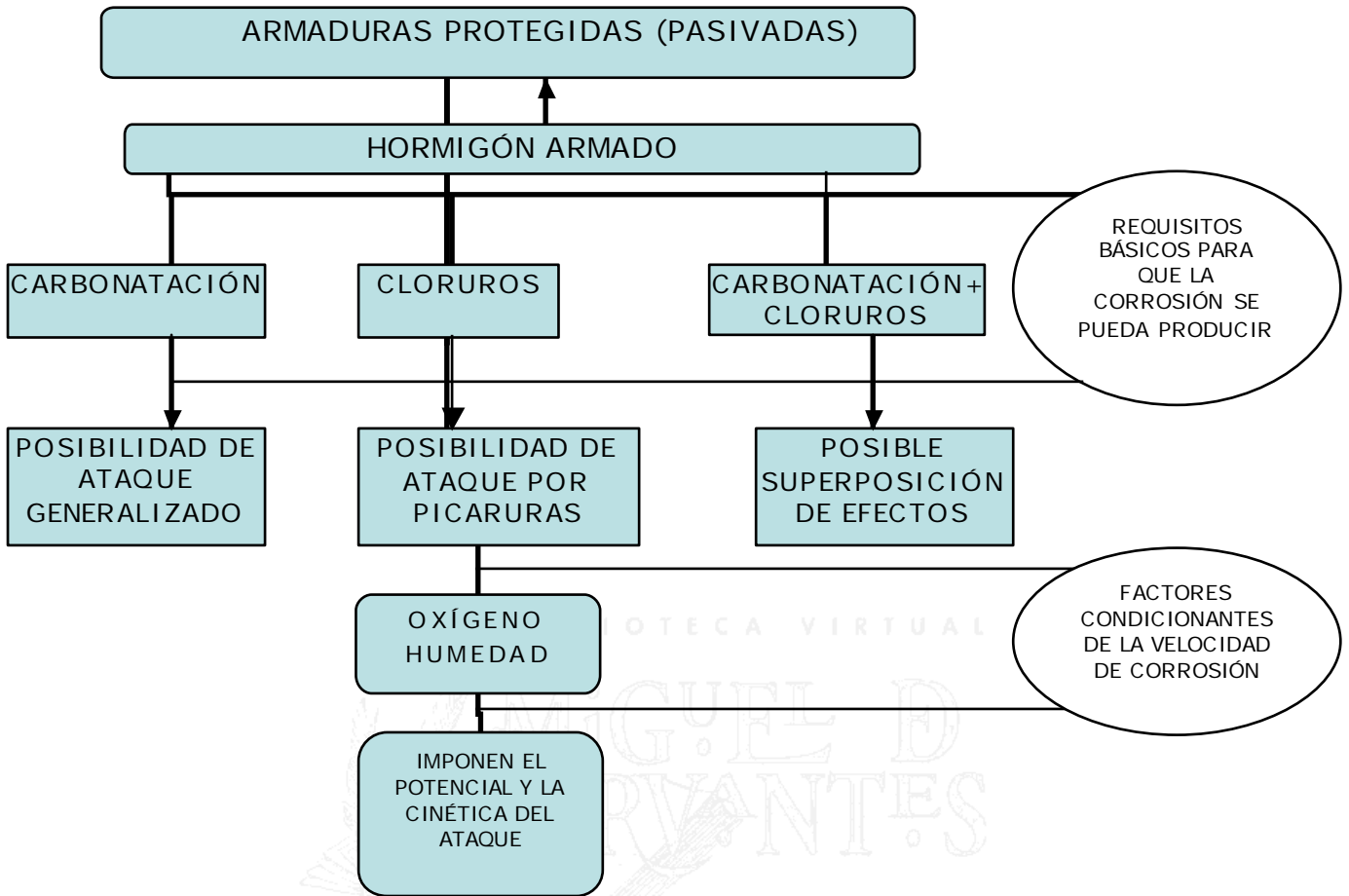


Figura 1.4. Factores desencadenantes y condicionantes de la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón armado.

1.2.3. Tipos de corrosión

Atendiendo a la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: generalizada y localizada, como se muestra en la figura

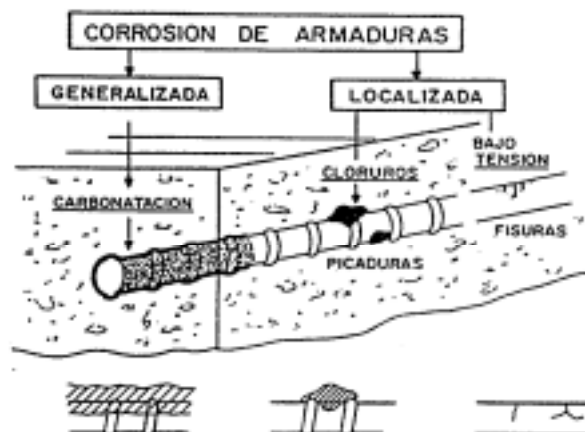


Figura 1.5. Tipos de corrosión en hormigón armado.

- Corrosión localizada

Se caracteriza por la destrucción local de la capa pasivante debido a la acción de un agente agresivo. La causa más frecuente que induce este tipo de corrosión es la presencia de *iones despasivantes*, tales como los cloruros, que al superar un determinado valor crítico rompen localmente la capa pasivante. Después de los iones cloruros, que son los responsables del mayor número de casos de corrosión de armaduras, los más peligrosos son los iones sulfatos y sulfuros, pero son mucho menos frecuentes que los anteriores. Todos estos agentes aparecen en la figura 1.6, además de otros de menor importancia.

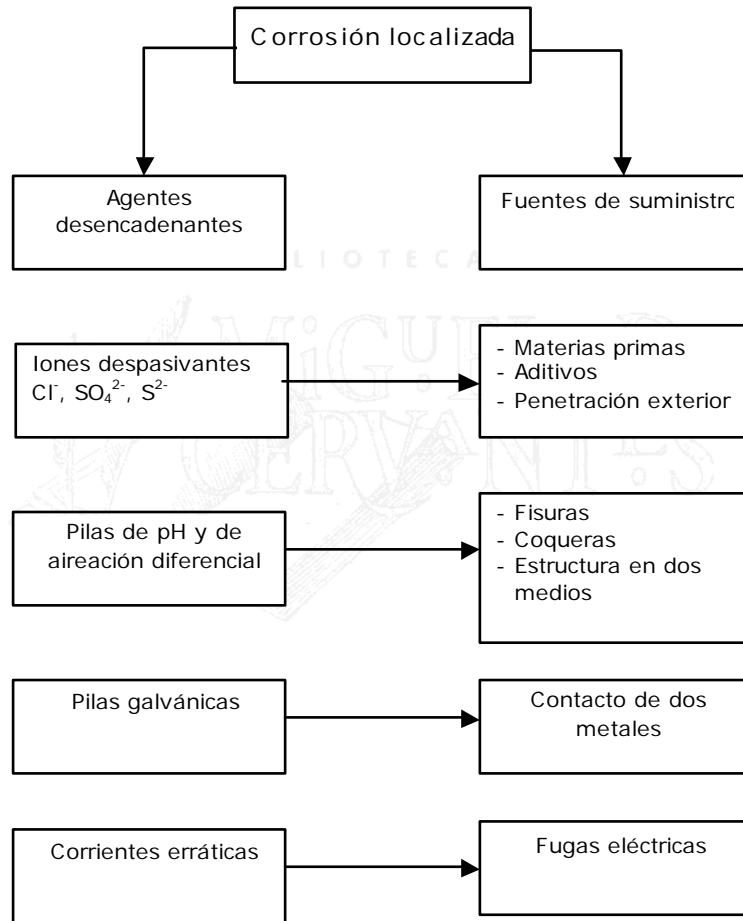


Figura 1.6. Factores que provocan la corrosión localizada.

Otro tipo de corrosión localizada es la llamada *corrosión bajo tensión* que sólo se aprecia en el hormigón pretensado o postensado.

Para que un fenómeno de corrosión bajo tensión (CBT) pueda tener lugar deben conjugarse simultáneamente varios factores: metal o aleación susceptible de sufrirlo, nivel de tensiones mecánicas superior a un determinado límite y medio agresivo específico.

-Corrosión generalizada: carbonatación del hormigón

Se caracteriza por un ataque uniforme en toda la superficie del acero debido a un descenso de la alcalinidad en el hormigón que rompe la capa pasiva al llegar hasta el

acero. Puede ser debido a un “deslavado” por circulación de aguas puras o ligeramente ácidas o por la reacción de compuestos de carácter básico presentes en el hormigón con componentes ácidos presentes en la atmósfera, siendo la carbonatación el fenómeno más frecuente. El dióxido de carbono que hay en la atmósfera reacciona con las sustancias alcalinas de la solución porosa y con los componentes hidratados del hormigón, dando lugar a un descenso del pH del hormigón por debajo de un determinado valor crítico y produciendo la disolución completa de la capa pasivante.

1.2.4. Factores desencadenantes de la corrosión de armaduras en contacto con hormigón.

1.2.4.1. Corrosión inducida por cloruros

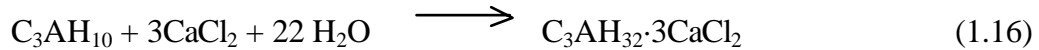
Los iones cloruro llegan al hormigón o bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua,...) durante el amasado, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales para el deshielo de carreteras o puentes, en climas fríos.

De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica en la cual se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero.

El ión cloruro Cl⁻ penetra en el hormigón a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloruro disueltos en los poros pueden interaccionar con las fases sólidas del hormigón quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del hormigón puede encontrarse en varios estados:

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

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros a las fases sólidas (*Taylor, 1967*), son tanto de tipo químico como de tipo físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el aluminato tricálcico. Este componente del cemento reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o “sal de Friedel” $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_{32} \cdot 3CaCl_2$ según las reacciones:



La unión física de los cloruros a las fases sólidas del hormigón se produce mediante el fenómeno conocido como adsorción. Los cloruros disueltos en el agua de los poros se unen a la superficie de las partículas sólidas del hormigón. El principal sólido responsable de la adsorción es el gel CSH, que durante la hidratación del hormigón precipita en forma coloidal presentando un área superficial muy elevada. Sobre esta gran superficie se adsorben los cloruros.

El cloruro libre es el más peligroso ya que al quedar disuelto en el agua de los poros, es capaz de despasivar la armadura e iniciar su corrosión, localizándose en determinados puntos del acero. Es muy importante conocer la capacidad de ligar cloruros de cada hormigón. Los que son capaces de ligar muchos cloruros, son menos susceptibles de sufrir la corrosión de sus armaduras. También debe tenerse en cuenta, que aunque el cloruro ligado no puede inducir la corrosión de las armaduras, si que puede ser liberado en determinadas circunstancias. Por ejemplo, la carbonatación del hormigón produce la liberación del cloruro ligado, pasando éste a ser cloruro libre e incrementando, por tanto, el riesgo de corrosión. En cualquier caso, las normativas siempre se refieren al límite de cloruros totales.

Además de un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros y en general todas las sales, pueden penetrar mucho más rápidamente por un mecanismo de succión capilar, muy propio de ambientes de niebla salina existente en climas cálidos marinos, en los que los cloruros están suspendidos en las gotitas de humedad del aire. En este fenómeno incide mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

Todas las normativas limitan el contenido en cloruros en el hormigón fresco, pero estos límites varían de un país a otro. Ello es debido a la dificultad de establecer un límite seguro, por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero, ya que este límite depende de numerosas variables, algunas de las cuales son: tipos de cemento (finura, contenido de yeso, contenido en aluminato tricálcico, etc.) (*Fernández Cánovas, 1994*), proporción de cemento, relación a/ c, contenido de humedad, etc. En España para el hormigón armado el límite lo fija la EHE en un 0.4 % respecto a la masa de cemento, y para el hormigón pretensado en un 0.2% respecto a la masa de cemento.

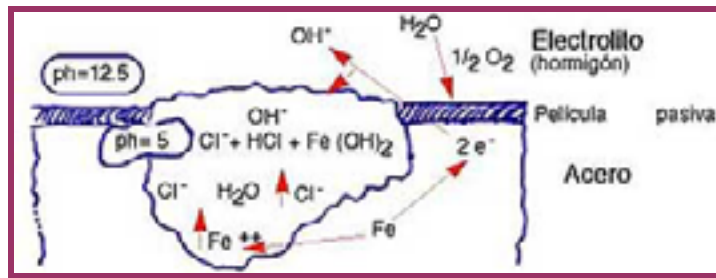


Figura 1.7. Esquema simplificado del proceso de corrosión del acero en presencia de cloruros, propuesto por CEB – FIP (Comité Europeen du Beton (CEB), 1990).

1.2.4.2. Carbonatación del hormigón

Se produce cuando disminuye la alcalinidad del hormigón, como se ha comentado anteriormente en el apartado 1.2.3.

El NaOH, KOH y Ca(OH)_2 disueltos en la solución acuosa de la red de poros del hormigón así como posiblemente los álcalis solubles de los agregados, provocan un pH de la disolución presente en los poros entre 12.5 y 13.5 (Schiesl, 1984).

El hormigón es un material muy poroso que permite la penetración en su interior del CO_2 del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO_2 con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose carbonato cálcico (Verbeck, 1958).

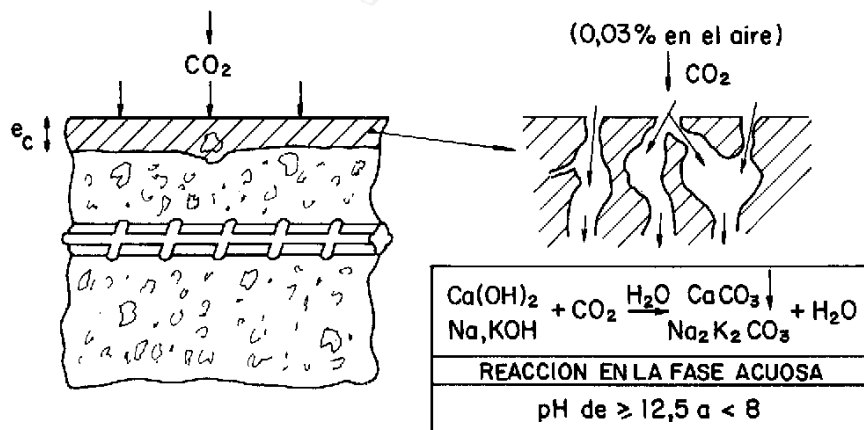


Figura 1.7. Carbonatación del recubrimiento de hormigón que debe proteger el acero.

Cuando todo el Ca(OH)_2 , KOH y NaOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH empieza a decrecer. Al mismo tiempo los silicatos de calcio también reaccionan con el CO_2 del aire. Tan pronto como todo el cemento endurecido ha sido completamente carbonatado, se mide un pH menor de 9.

Una de las características de este proceso es la existencia de un frente de avance que separa el hormigón en dos zonas con valores de pH muy diferentes, una de $\text{pH} > 12$ y otra de $\text{pH} < 9$. El frente de carbonatación se puede comprobar aplicando sobre el hormigón

un indicador que se conoce como fenolftaleína, si la superficie permanece alcalina toma un color rojo-púrpura, y si la zona está carbonatada la fenolftaleína se vuelve incolora.



Figura 1.8. Aspecto que presenta una muestra después de adicionarle solución alcohólica de fenolftaleína al 1%.

El avance de la carbonatación es un proceso lento, cuya velocidad se atenúa con el tiempo, ajustándose a una ley parabólica del tipo:

$$x_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad (1.17)$$

Siendo:

x_c : Profundidad de la capa carbonatada en mm

K_c : Constante de carbonatación en $\text{mm/año}^{0.5}$

t: Tiempo (edad del hormigón)

El desarrollo de la carbonatación depende de diversos factores, entre los que se pueden enumerar los siguientes: contenido de CO_2 en la atmósfera, permeabilidad del hormigón, cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento) y humedad relativa del ambiente.

El aumento de la relación agua/cemento favorece el proceso de carbonatación, al proporcionar hormigones más permeables. En cuanto a la humedad, en hormigones secos o completamente saturados no es posible que se produzca carbonatación, produciéndose la penetración máxima de CO_2 atmosférico en el hormigón a humedades comprendidas entre el 50% y el 70%.

Se llama “período de iniciación” de la carbonatación al tiempo que tarda en llegar el frente carbonatado hasta la armadura. Una vez ha llegado dicho frente al acero, la capa pasivante de éste se destruye, puesto que al estar el hormigón carbonatado el pH se sitúa alrededor de 7. Al destruirse la capa pasivante el acero se corroe de forma generalizada, tal y como si estuviera simplemente expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del hormigón y por tanto en contacto con la armadura mucho más tiempo que si ésta estuviera libremente expuesta al aire, ya que el hormigón absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio.

1.2.4.3. Combinación de carbonatación más iones cloruro.

Si la carbonatación tiene lugar en un hormigón que contiene cloruros, los efectos de ambos agresivos se suman dando lugar a una fuerte corrosión. Además por efecto de la acción del CO_2 sobre las fases sólidas del cemento, los cloroaluminatos se pueden disgregar y dejar libres a los cloruros que mantenían combinados (Suryavanshi, 1996).

Una estimación del contenido crítico de cloruros en función de la calidad del hormigón, de su posible carbonatación y de las condiciones medio ambientales se muestra en la figura 1.9 (Schiessl, 1984)

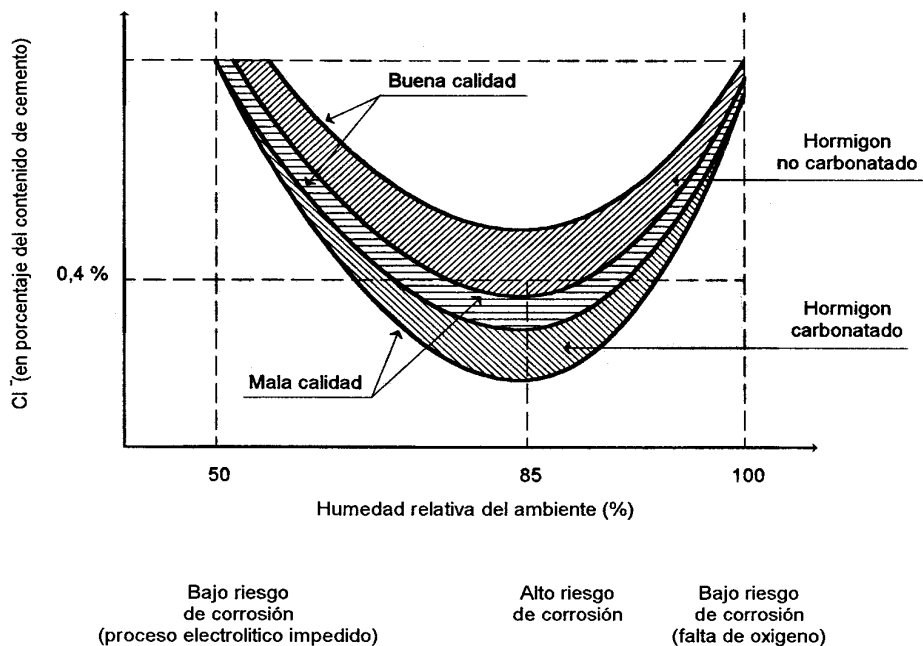


Figura 1.9. Esquema del contenido crítico de cloruros en función de la humedad ambiente, la calidad del hormigón y su posible carbonatación.

1.2.4.4. Influencia de las fisuras.

Las grietas que aparecen en el hormigón son un rápido camino para la penetración de los agentes agresivos hasta la armadura. Cuando estos agentes agresivos entrando por la fisura alcanzan la armadura, se empieza a corroer la zona no recubierta de hormigón que actúa como ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo (*Figura 1.10*)

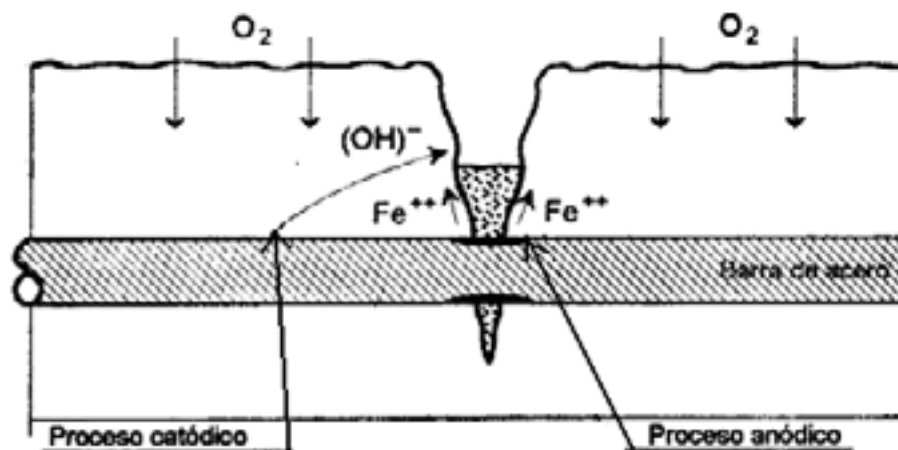


Figura 1.10. Corrosión por fisuras transversales.

Las fisuras pueden ser transversales y longitudinales, siendo estas últimas mucho más perjudiciales porque abarcan mayor superficie de acción.

Las normativas establecen un ancho máximo admisible de las fisuras en la superficie de hormigón y que se sitúa entre 0,3 y 0,4 mm para ambientes no agresivos y en tan solo 0,1 mm para ambientes agresivos. Pero también se ha demostrado que no existen diferencias muy importantes en el comportamiento de las fisuras siempre que éstas tengan anchos inferiores a 0,4 mm, puesto que las fisuras se obstruyen con los propios productos de la corrosión. Sin embargo, factores como relación recubrimiento/diámetro de la armadura y calidad del recubrimiento, han resultado más decisivos en algunos trabajos.

1.2.5. Factores acelerantes de la corrosión.

Pero los factores desencadenantes anteriormente citados no actúan solos, se ayudan de otros factores que son los encargados de acelerar el proceso de corrosión y que son los siguientes:

a) Contenido de humedad.

El hormigón absorbe fácilmente la humedad ambiente, pero tarda mucho tiempo en secarse. Esto da lugar a que la humedad del interior del hormigón sea superior a la humedad ambiente.

Si la humedad exterior permanece constante, se establece un equilibrio entre el contenido de humedad en el interior y la humedad ambiental (HR, humedad relativa). Pero si por el contrario, la humedad ambiental oscila, el interior del hormigón no puede

seguir los cambios a la misma velocidad, por tanto, sólo la capa exterior del hormigón es la que mantiene el equilibrio con la humedad relativa exterior.

El contenido de humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión. Si los poros contienen poca humedad (Figura 1.11.a), la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se encuentra muy dificultado. En estas condiciones, la velocidad de corrosión será baja a pesar de tratarse de un hormigón carbonatado o contaminado por cloruros.

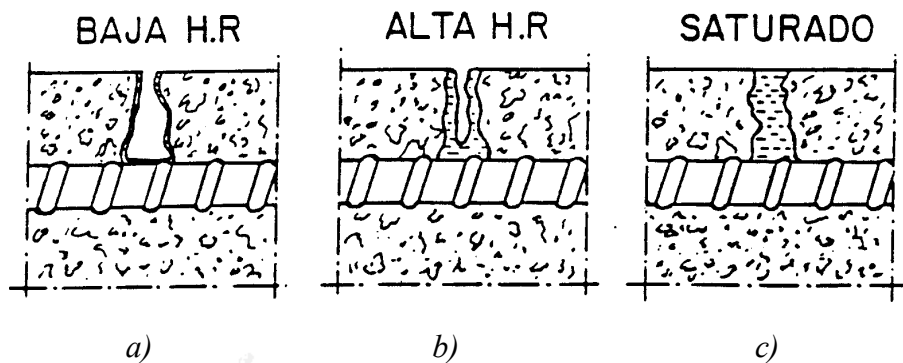


Figura 1.11. Contenido de humedad en los poros dependiendo de la humedad ambiental.

Si la humedad relativa es alta, pero no llega a saturar los poros, la velocidad de corrosión es elevada porque el oxígeno llega hasta la armadura y la resistividad es tan baja que da lugar a velocidades de corrosión máximas (Figura 1.11.b)

La corrosión no se puede producir cuando el hormigón está totalmente seco porque no se puede desarrollar el proceso electroquímico. Tampoco si los poros están saturados de humedad (Figura 1.11.c). En este caso la resistividad será la menor posible y la pila de corrosión se verá favorecida, pero sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua y difundir a su través para poder alcanzar la armadura dando lugar a velocidades de corrosión moderadas e incluso bajas.

b) Proporción de cloruros.

Otro factor que puede acelerar la corrosión es la proporción de cloruros o la relación Cl^- / OH^- . Como hemos dicho anteriormente la presencia de ión cloruro induce la despasivación de la armadura, pero además, cuanto mayor es esta proporción mayor puede ser la velocidad de corrosión. Esto es debido a que por un lado una mayor cantidad de cloruros aumenta el porcentaje de área atacada, y por otro, permite un mayor grado de acidificación local en las áreas corroídas.

c) Temperatura.

La temperatura desempeña un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, un incremento de temperatura da lugar a un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones. Y por otro lado, una disminución de la misma origina condensaciones, que a su vez pueden producir incrementos locales de contenido en humedad.

Es importante destacar que la humedad, el oxígeno y la temperatura pueden tener efectos contrapuestos (Andrade, 2002), ya que una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso de oxígeno, o bien un incremento de temperatura, acelera el movimiento de los iones, pero disminuye la condensación.

d) *Macropares galvánicos.*

Se trata de pilas de corrosión generadas entre dos áreas distanciadas tan sólo unos decímetros. Una de ellas está corroída y actúa como ánodo, y la otra que actúa como cátodo permanece pasiva.

En la Figura 1.12, se puede ver un ejemplo de un macropar galvánico. Se trata de una viga de un tablero de un puente, a la que los cloruros acceden por la parte superior como consecuencia del uso de sales para evitar las heladas.

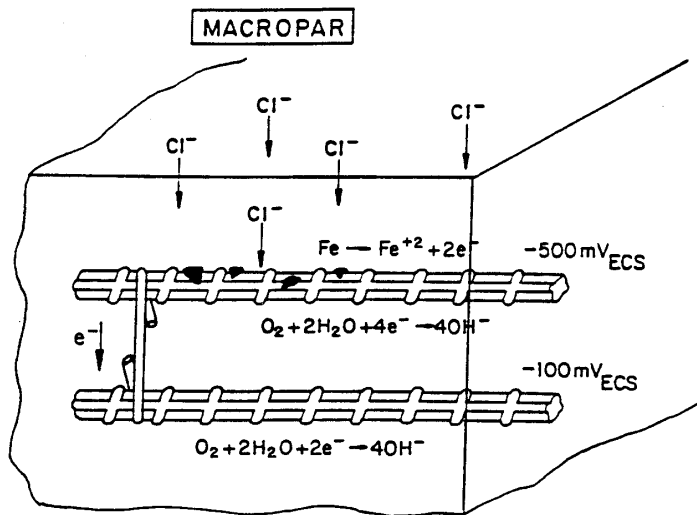


Figura 1.12. Esquema del funcionamiento de un macropar debido a la corrosión por cloruros.

La macropila se forma a través de los estribos, y la corrosión empieza en las armaduras superiores, mientras que las inferiores permanecerán pasivas más tiempo.

Cuando una situación como esta se produce sobre la estructura de hormigón, a la corrosión propia de las micropilas (debidas al ataque por cloruros) se suma la acción de la macropila, aumentando la velocidad de corrosión. El incremento que se produzca dependerá de los potenciales de corrosión del ánodo y del cátodo cuando empiece la acción de la macropila y de la resistencia óhmica entre ambos.

1.2.6. Efectos derivados de la corrosión

Podemos considerar tres efectos derivados de la corrosión:

- a) Sobre el hormigón, cuando éste se fisura y se desprende.

- b) Sobre el acero, al producirse una disminución de su capacidad mecánica por pérdida de sección transversal.
- c) Sobre el sistema acero/ hormigón, al producirse una pérdida de adherencia de las armaduras embebidas en el hormigón.

Como consecuencia de la corrosión se produce un incremento del volumen de las armaduras provocando la aparición de elevadas tensiones que dan lugar a la fisuración del hormigón. Este deterioro del hormigón hace que al continuar el fenómeno de la corrosión los agentes agresivos penetren en el interior del mismo con mayor facilidad.

Pero no siempre se produce fisuración cuando las armaduras se corroen, si el hormigón está muy húmedo, los óxidos se generan a una velocidad constante y pueden emigrar a través de la red de poros y aparecer en la superficie en forma de manchas. Estas manchas pueden o no coincidir con la situación de las armaduras, ya que si hay circulación de agua aparecen donde emerge la humedad.



1.2.7. Predicción de la vida útil de una estructura.

La vida útil de una estructura se puede definir como el periodo de tiempo durante el cuál la estructura conserva todas las características de funcionalidad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente.

El modelo más extendido para predecir la vida útil de una estructura de hormigón armado es el que propuso Tuutti, y que se muestra en la Figura 1.13. En él se representa en abscisas el tiempo y en ordenadas el grado de deterioro.

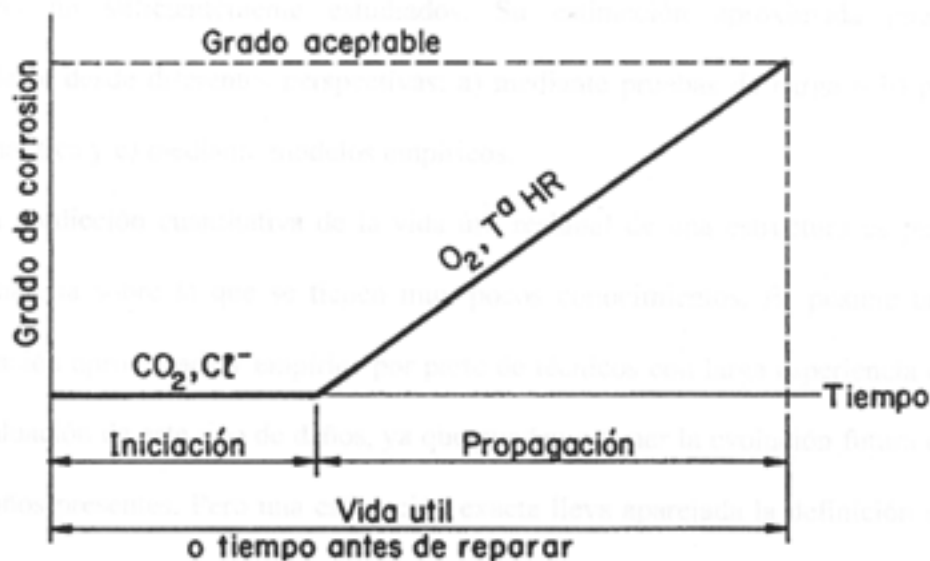


Figura 1.13. Modelo de vida útil de Tuutti.

Se define como “*periodo de iniciación*” al tiempo que tarda el agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. Y “*periodo de propagación*” es el tiempo que comprende una acumulación progresiva del deterioro, hasta que se alcanza un nivel inaceptable del mismo.

La presencia de cloruros y la disminución de la alcalinidad son los factores que actúan durante el periodo de iniciación (factores desencadenantes). Una vez han alcanzado la armadura, los factores que inciden en que el periodo de propagación sea más o menos rápido son el contenido de humedad y de oxígeno (factores acelerantes) del hormigón que rodea a la armadura.

1.2.8. Vida residual de una estructura de hormigón armado.

Se define como vida útil residual el periodo de tiempo en el que la estructura cumple las prestaciones para las que ha sido calculada sin costos importantes de mantenimiento.

Sin embargo, la predicción cuantitativa de la vida útil residual de una estructura es una materia sobre la que se tienen pocos conocimientos. Es posible una estimación aproximada y empírica por parte de técnicos con larga experiencia en la evaluación de este tipo de daños, ya que pueden estimar la evolución futura de los daños presentes. Pero una estimación exacta lleva aparejada la definición de los niveles inaceptables de daños y de la elección del parámetro controlador o estimador del daño, aspectos sobre los que todavía existen muy pocos estudios.

En cualquier caso, la decisión sobre reparar o no una estructura y el momento óptimo para hacerlo es una cuestión técnico-económica donde ambos factores deben valorarse. Cuando una estructura está dañada, la corrosión continuará a menos que desaparezcan las causas que provocaron el deterioro.

1.3. Intervención en estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión de sus armaduras.

Previamente a cualquier intervención sobre la estructura dañada, es necesario conocer cuál ha sido la causa que originó la corrosión, sus efectos y su influencia.

Para actuar sobre el fenómeno corrosivo podemos adoptar una de las siguientes medidas:

- Demolición de la estructura dañada o sustitución del elemento dañado.
- Control y seguimiento del avance del deterioro hasta llegar a una situación límite, pero sin intervenir en el proceso de corrosión.
- Actuar sobre el proceso de corrosión, que en función del daño producido utilizaremos un método u otro (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros, etc.)

1.3.1. Eliminación del hormigón dañado por métodos tradicionales.

Los métodos tradicionales se basan en una reparación del hormigón deteriorado, eliminándolo parcial o totalmente, dependiendo del alcance del daño. Esta técnica se conoce como “reparación por parcheo”. Con ella se pretende reconstituir las propiedades físicas y estéticas de la estructura de hormigón, y también la protección de las armaduras utilizando un material que repase el acero y forme una barrera de protección.

El procedimiento a seguir para reparar el hormigón dañado es:

- Preparación previa de la estructura: apuntalamiento provisional si la capacidad resistente no es la suficiente.
- Eliminación del hormigón dañado hasta unos 2,5 cm por detrás de la armadura, para poder limpiarlas fácilmente.
- Limpieza del óxido que recubre las armaduras con un chorreado de arena o cepillado. Sólo se realiza si la corrosión es debida a los cloruros.

- Colocación del material de reparación. Se suele colocar algún tipo de resina asegurando la perfecta adherencia.

Si se produce una pérdida de sección de las armaduras de alrededor del 15-25 %, éstas se sustituyen por otras en buen estado.

1.3.2. Métodos de reparación del hormigón dañado no tradicionales.

Protección Catódica (PC)

La protección catódica se basa en llevar las armaduras embebidas en el hormigón a un potencial de valor tal que la corrosión no pueda tener lugar. Se trata de situar el acero en la zona de inmunidad de los diagramas de Pourbaix. Ello se consigue reduciendo el contenido en oxígeno, o haciendo actuar a toda la armadura como cátodo. Este último supuesto se puede llevar a cabo mediante dos métodos:

1) Conectando la armadura a los llamados “ánodos de sacrificio”, (Figura 1.14), que son materiales que poseen mayor tendencia a corroerse que el acero del hormigón, como magnesio, cinc o aluminio, o aleaciones basadas en estos metales. En estructuras de hormigón, estos ánodos deben ser compatibles con el material cementicio para evitar el deterioro de aquellos debido a reacciones de autocorrosión.

2) Por el método de “corriente impresa” (Figura 1.15), en el cual la protección se lleva a cabo por medio de una fuente externa de corriente continua. El terminal positivo de la fuente debe conectarse a un ánodo auxiliar, mientras que el negativo se conecta a la armadura a proteger (CEN 2000 12696-1).

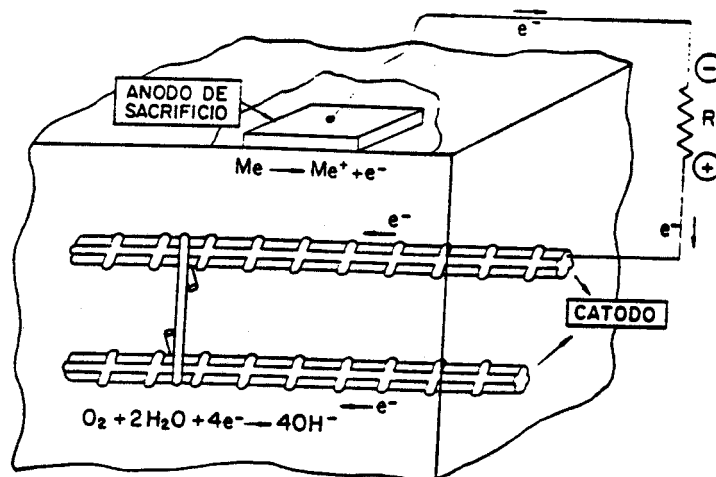


Figura 1.14. Protección catódica mediante “ánodos de sacrificio”.

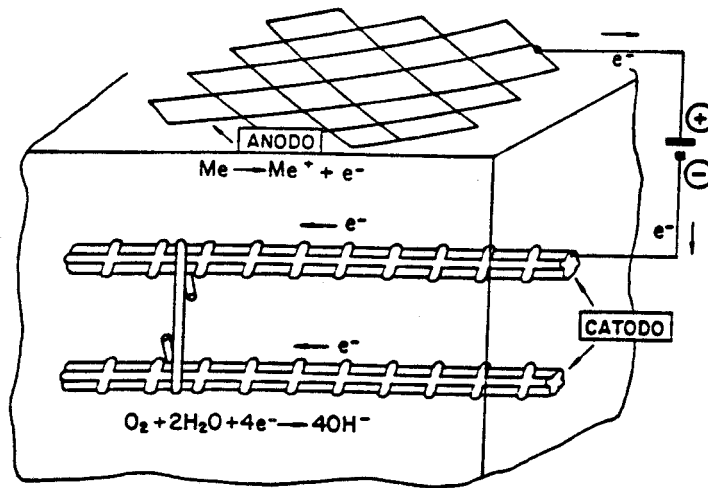


Figura 1.15. Protección catódica mediante "corriente impresa".

Una de las ventajas de este método es que no es necesario eliminar el hormigón contaminado, aunque sí es recomendable reconstruir las zonas dañadas para asegurar una buena distribución de la corriente. Sin embargo, también presenta una serie de inconvenientes como:

- Elevados costos económicos de ejecución y mantenimiento.
- No se conocen bien los efectos a largo plazo sobre la adherencia.
- No se conoce con exactitud cuándo y cómo instalar la protección catódica.

Realcalinización

Esta técnica puede ser aplicada utilizando dos métodos diferentes: con y sin corriente eléctrica.

La realcalinización sin corriente eléctrica se basa en el hecho de la elevada movilidad de los iones OH^- que son capaces de difundir desde zonas de elevado pH a otras de menor pH. En un hormigón carbonatado, se realiza un recrecido con un mortero rico en cemento. Este cemento al ser muy alcalino puede realcalinizar el interior del hormigón en una profundidad de 1 ó 2 cm. Por ello, es fundamental mantener húmeda la capa de recrecido, favoreciendo así la difusión de los OH^- desde el exterior hacia el interior.

La realcalinización con corriente eléctrica es un método que actúa con más rapidez. Consiste en aplicar una corriente eléctrica que produzca OH^- en las armaduras por electrólisis. El dispositivo es similar al de la protección catódica.

Pero la eficiencia de este método es muy discutida tanto por los costos económicos, como por el alcance y duración de los efectos, ya que el pH que se alcanza

llega hasta 9 ó 10, pero no restaura ni la reserva alcalina ni los pH habituales en el hormigón. Este método es utilizado para colocar una barrera anticarbonatación en las superficies del hormigón tratado. No se abordará en el presente trabajo.

Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC)

La técnica de la extracción de cloruros es similar a la de la protección catódica, aunque se aplica una corriente mayor para forzar a los iones cloruro a migrar hacia el ánodo. El ánodo se coloca sobre la superficie del hormigón de forma temporal. Este método se describirá con más detalle en los apartados siguientes.

1.4. Extracción electroquímica de cloruros.

1.4.1. Antecedentes más notorios sobre el fundamento y aplicación del método

Las primeras pruebas de EEC fueron realizadas en EEUU desde 1973 a 1975 (*Morrison, 1976 y Lankard, 1975*). Mediante ensayos de laboratorio, empleando altos voltajes, se llegó a la conclusión de que el método obtenía resultados satisfactorios en lo que respecta a la extracción de cloruros, pero también presentaba gran número de inconvenientes. La eficiencia conseguida fue muy baja, de modo que sólo el 6% de la carga que circulaba a través del hormigón era transportada por cloruro; se produjeron redistribuciones de cloruros importantes después del tratamiento; la temperatura del hormigón se elevó desde 24° a 52°C en 24 h. Además se pudo apreciar un aumento considerable de la porosidad

Después de estos dos estudios, la investigación de este método no se siguió durante un tiempo, debido a varios factores, tales como la seguridad y el alto voltaje requerido, la baja eficiencia obtenida y los daños potenciales sobre la estructura, como la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón, las grietas producidas por la presión del gas H₂ gaseoso y las altas temperaturas alcanzadas en el hormigón

En Europa, se obtuvo una patente llamada “Extracción de cloruros del hormigón” (*Noteby, 1986*). El material usado es pasta de papel como material para retener el electrolito exterior. Se aplica mediante proyección por pistola, lo que permite su fijación sobre superficies verticales. El ánodo queda embebido en la pasta, los voltajes empleados son de aproximadamente 30V, bastante menores a los empleados en los estudios anteriores, pero la duración del tratamiento también fue superior.

En EEUU el método fue estudiado con mayor detalle entre 1988 y 1993 dentro del “Strategic Highway Research Program” (SHRP) (*Bennett, 1993*). SHRP recomienda el uso de una malla de titanio disponible comercialmente como ánodo, el empleo de un electrolito alcalino para prevenir tanto la formación del gas cloro como el deterioro de la superficie del hormigón y densidades de corriente de entre 1 y 5 A/m². De este modo entre el 10% y el 30% de la corriente se empleaba en transportar cloruro. Después de una carga de 2·10⁶ C/m²-5·10⁶ C/m², la extracción de cloruro se hace ineficiente; lo cual

sucedía de 10 a 50 días de aplicación. Con este procedimiento pudo extraerse entre el 20% y el 50% de cloruro inicial. Los estudios realizados a partir de estos datos recomendaron el empleo de este método cuando la corrosión está en sus primeras etapas y el hormigón no ha sufrido un deterioro importante. En tales casos la vida de la estructura puede prolongarse de 5 a 10 años.

El primer estudio europeo bien documentado de la aplicación en campo del procedimiento fue realizado por la Swiss Federal Highway Agency en 1990 (*Elsener, 1992*). Los resultados mostraron que cerca del 50% del cloruro pudo ser extraído en 8 semanas, comprobando que el procedimiento podía emplearse en estructuras muy contaminadas, si bien en los casos de contaminación muy heterogénea, podía ser necesario más de un tratamiento.

Una interesante variación fue aportada por Rose en 1994 (*Mietz, 1998*) que consiste en emplear, en lugar de la malla de titanio, una lámina de papel de aluminio como ánodo exterior. El mecanismo de este método es la autorregulación ya que el papel de aluminio actúa como un ánodo de sacrificio y se disuelve a una velocidad proporcional a la densidad de corriente. En las zonas donde, debido a algún tipo de defecto local, la resistividad del hormigón es muy pequeña, pasa una gran cantidad de corriente, disolviéndose el aluminio e impidiendo el paso posterior de corriente, funcionando como un regulador de corriente en el caso de hormigones muy heterogéneos.

Dentro del programa europeo COST 509 de Corrosión y Protección de Metales en contacto con Hormigón, que comenzó en 1992 y fue completado en 1996, la EEC fue estudiada por las instituciones investigadoras que cooperaban en Austria, Noruega, Inglaterra y Holanda. Los grupos habían preparado un documento enfocado en aplicaciones prácticas que fue publicado en 1997.

1.4.2. Fundamento

La figura 1.16 muestra el esquema de funcionamiento de la EEC. El método consiste en aplicar una corriente eléctrica continua entre la armadura que actúa como cátodo y un ánodo exterior que se coloca de forma temporal sobre la superficie del hormigón. El electrodo externo es preferentemente una malla de titanio, y debe estar en contacto con un electrolito, que se coloca sobre la superficie del hormigón, para asegurar la conducción al refuerzo.

Los iones con carga negativa, como son los iones cloruro, migran en el campo formado por la corriente eléctrica desde la armadura a la superficie, donde está situado el ánodo exterior.

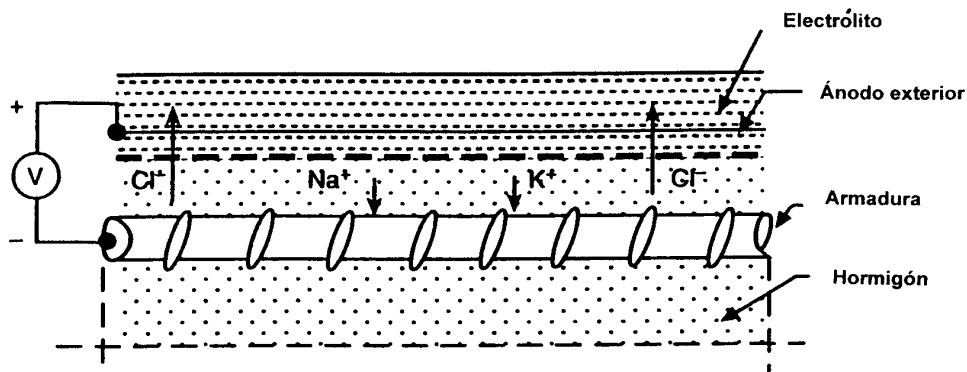
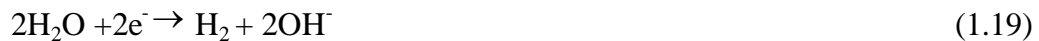


Figura 1.16. Esquema del funcionamiento de la extracción electroquímica de cloruros.

Como resultado de la migración de iones disueltos en la solución porosa del hormigón y de las reacciones que ocurren en los electrodos, hay cambios en la concentración de los iones que intervienen en el proceso de EEC.

En el cátodo el agua se reduce a iones hidróxido. Después de consumirse el oxígeno disponible de acuerdo con la ecuación (1.20), lo cual ocurre en menos de 24 horas, la reacción catódica que se produce es la (1.19), generándose iones hidróxido e hidrógeno gas. De este modo en el cátodo hay una producción continua de iones OH⁻ que se mueven hacia el ánodo, y como consecuencia un aumento de la concentración en la vecindad del refuerzo



En el ánodo, de acuerdo con (1.20), se produce la electrólisis del agua, después de agotados los iones OH⁻ según (1.21). Cuando en el ánodo se usa agua como electrolito exterior, la única reacción que puede darse inicialmente es la (1.20) porque no existe ninguna sal. Los iones H⁺ formados se mueven hacia el cátodo, encontrándose con los iones OH⁻ y los iones Cl⁻ que se mueven en la dirección contraria. Los iones OH⁻ se neutralizan formando agua, con los iones Cl⁻ se forma ácido clorhídrico, midiéndose valores de pH de entre 1.5 y 3. De acuerdo con (1.22) los iones cloruro que llegan al ánodo se descargan formando cloro gas.



Cuando se usa una solución alcalina, como electrolito exterior, los iones OH⁻ presentes en el ánodo se convierten en oxígeno gas y moléculas de agua de acuerdo con la ecuación (1.21) y como consecuencia el valor del pH en el electrolito disminuye, pero el medio no se acidifica por la formación de iones H⁺ y tampoco se forma gas cloro.

Con valores de pH de aproximadamente 7, las reacciones (1.20) y (1.22) tienen más facilidad para producirse que la reacción (1.21)

Para muchos autores, el incremento de iones OH^- alrededor de la armadura, junto con la disminución de iones cloruro, parece que podría repasar el acero, si es posible llegar a concentraciones de cloruro inferiores a los valores críticos (Cobo, 2001).

1.4.3. Factores que pueden condicionar la técnica de EEC

1.4.3.1 El campo eléctrico

Debido a que el ión cloruro es transportado a lo largo del campo eléctrico, su distribución junto al refuerzo y la colocación del ánodo en la superficie del hormigón es importante. La figura muestra la distribución de las líneas de corriente entre un conductor lineal y una superficie exterior. Como se puede apreciar, en la vertical de la barra las líneas de corriente son más cortas, eso significa que la fuerza que actúa sobre los iones es mayor y también, por tanto, su velocidad de extracción. Por detrás de la barra, la cantidad de cloruro que se puede extraer es significativamente menor.

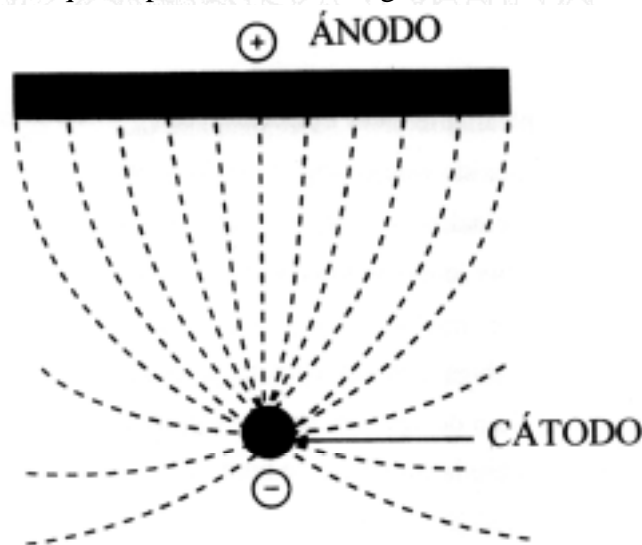


Figura 1.17. Distribución de las líneas del campo eléctrico.

1.4.3.2. Espesor de recubrimiento

De las interacciones antes explicadas es bastante obvio que las diferencias en el grosor de las coberturas juega un papel importante. Dentro del área a ser reparada las densidades de corriente más altas serán las de zonas donde la cobertura es más delgada (la resistencia eléctrica entre el refuerzo y el ánodo es la más baja). Esto significa que la eficiencia de la EEC en hormigón con coberturas de grosor variable será más baja en las zonas donde la cobertura sea gruesa y relativamente alta en áreas donde sea delgada.

Es importante, prestar atención especial en áreas de baja resistencia, por ejemplo donde hay peligro de que el electrolito externo toque directamente la superficie del acero. Por tanto, grietas y otros defectos deberían estar sellados antes de comenzar el tratamiento de EEC.

1.4.3.3. Transporte iónico en soluciones acuosas

Las soluciones acuosas de sales, bases, ácidos, etc. son conductoras. Estas sustancias se presentan en disolución en forma disociada, están separadas en partículas cargadas (iones). Cuando se aplica un voltaje, las partículas comienzan a moverse a través del campo eléctrico formado junto a los electrodos. Este tipo de movimiento se llama migración. Además de la migración debemos considerar los movimientos de los iones por difusión (en caso de gradientes de concentración) y convección (movimiento de iones por influencias mecánicas, por movimientos, o por gradientes de temperaturas).

La corriente eléctrica que circula a través de la disolución a un voltaje y temperatura dados, es proporcional al número de iones presentes en la disolución y además depende de la velocidad a la que estos iones son capaces de moverse hacia los electrodos. La temperatura también tiene una fuerte influencia en la conductividad del electrolito de forma que aumenta con la misma, mientras que decrece en el caso de conductores metálicos.

La conductividad total del electrolito es la suma total de las conductividades parciales de cada ión. La contribución de cada ión al total de la corriente se llama número de transporte. El n° de transporte depende de la concentración y es un importante parámetro electroquímico, que representa el cociente entre la corriente transportada por el cloruro y la total

$$t_{Cl^-} = \frac{Q_{Cl^-}}{Q_{total}} \quad (1.24)$$

El n° de transporte es independiente de la densidad de corriente aplicada. Esto significa que la extracción de una cierta cantidad de cloruros requiere más tiempo a bajas densidades de corriente que a elevadas densidades, mientras que la carga necesaria a pasar a través del electrolito es la misma.

De la ecuación (1.24) se deduce que el n° de transporte llegará a ser tanto más grande cuanto mayor es la concentración de iones cloruro contaminando la disolución y menor es la concentración de otros iones con carga negativa. La disolución de los poros del hormigón contaminado con cloruros contiene fundamentalmente iones Cl^- y OH^- . La concentración de otros aniones, como SO_4^{2-} , es normalmente tan pequeña, comparada con el Cl^- y OH^- , que puede despreciarse.

El n° de transporte del Cl^- y por tanto, la cantidad de cloruro que puede eliminarse por EEC, será tanto mayor cuanto menor es el n° de OH^- presentes en la solución de los poros.

1.4.3.4. Transporte de iones en el hormigón

Las interacciones que aplicamos a soluciones acuosas son, básicamente, también válidas para el hormigón, ya que el transporte de corriente eléctrica se produce casi exclusivamente por migración de iones disueltos en los poros capilares del hormigón. A diferencia de lo que ocurre con soluciones no confinadas, los iones no pueden moverse al polo opuesto por el camino más corto. Ellos tienen que recorrer un estrecho camino con pequeños poros capilares y rodeados de partículas del bloque. Por esto, la actual distancia de recubrimiento, por ejemplo desde el refuerzo a la superficie del hormigón, es más larga que el espesor de recubrimiento. Además los iones sólo pueden ser transportados por poros abiertos, no por cerrados. También, la velocidad de migración de los iones en el hormigón depende tanto del volumen del poro como de la distribución y geometría de los mismos. Como los poros del hormigón proceden de la matriz del cemento, la posterior distribución de los mismos depende de la relación a/c, la compactación y curado del hormigón, etc., y la velocidad del transporte del Cl^- hacia fuera, varía de un caso a otro. Por esta razón, el movimiento de los iones causado por difusión y convección es más lento en el hormigón que en soluciones no confinadas. Comparado con el movimiento causado por migración, la contribución de la difusión y convección puede ser despreciables cuando se aplica densidades de corriente elevadas para la EEC.

La velocidad a la que el cloruro se extrae es directamente proporcional a la cantidad de corriente que pasa por el hormigón. Para un voltaje dado la corriente es mayor cuanto menor es la resistencia eléctrica del hormigón, de este modo, cuanto más húmedo está el hormigón, más eficaz resulta el tratamiento. La parte de corriente que es transportada por los iones cloruro es proporcional a su concentración.

1.4.4. Eficiencia de la EEC

1.4.4.1. Estrategias para determinar experimentalmente la eficiencia de la EEC

a) Determinar la disminución del contenido de Cl^- en el hormigón, por análisis químicos

Una manera de evaluar la eficiencia de la EEC es analizar muestras del contenido inicial de cloruro antes de comenzar las experiencias, y determinar la reducción del mismo, analizando muestras de testigos extraídos de los elementos estructurales, en las etapas intermedias de la EEC y al final de la misma, que es el procedimiento que hemos seguido en este trabajo.

La eficiencia varía para cada punto de muestreo, ya que depende de la concentración inicial de Cl^- , intensidad de campo eléctrico en dicho punto, resistividad, etc. También varía con el tiempo porque disminuye el contenido de Cl^- y aumenta el de

otros iones presentes en la disolución interna del hormigón (*Vennesland, 1996*), que también contribuyen al transporte de carga eléctrica.

Pueden determinarse eficiencias puntuales y también calcular por integración una eficiencia global para todo el elemento estructural. En el presente trabajo, hemos calculado eficiencias en diferentes profundidades, en muchos casos, para estudiar la reducción de ión cloruro en zonas cercanas o alejadas de las armaduras. También, se ha calculado la eficiencia global según el estudio en cuestión.

La eficiencia también depende del electrolito usado en el ánodo. El carbonato sódico da valores muy bajos debido a la disminución del número de transporte del cloruro por el aumento de la concentración de hidróxido. El agua y el hidróxido cálcico dan valores de eficiencia similares (*Cobo, 2001*).

b) Determinar el estado de corrosión del acero antes y después de la EEC mediante técnicas electroquímicas (E_{corr} , I_{corr})

Los valores de E_{corr} pueden ser usados para establecer el estado activo o pasivo de las armaduras (*Andrade, 1989; Odden, 1994*). La comparación de los valores de E_{corr} antes y después de la EEC es el modo más habitual para evaluar el comportamiento de una estructura reparada.

Como el potencial de corrosión es función de un gran número de variables (contenido de humedad y oxígeno del hormigón, espesor de recubrimiento, etc.) no se deben extraer conclusiones cuantitativas de su medida, ya que no da información de la cuantía de la corrosión, sino solo de que este proceso se haya producido o no. (*Andrade, 1989*). *Elsener y col. (Elsener, 1993)*, realizaron medidas sistemáticas del E_{corr} antes y después de la EEC para evaluar la eficiencia de dicho tratamiento en estructuras reales.

Las medidas de la velocidad de corrosión, I_{corr} , se pueden determinar mediante la aplicación de la técnica de resistencia de polarización (R_p). Estas medidas parecen no dar valores reales en periodos de tiempo cortos después de la interrupción de la corriente. Probablemente es debido a los cambios químicos inducidos en las armaduras (como la alta alcalinidad y la baja actividad del O_2) (*Green, 1993*)

En el presente trabajo se han realizado medidas de E_{corr} e I_{corr} , en diferentes condiciones de humedad y en diversos momentos del tratamiento. Se midieron potenciales y velocidades de corrosión después de pasadas horas o varios días al terminar cada etapa, e incluso años después de finalizar el tratamiento.

1.4.4.2 Modelos matemáticos para predecir la eficiencia de la EEC

Algunos autores (*Polder*, 1993; Andrade, 1995; Castellote, 2000; Wang, 2001*), entre otros, han descrito modelos matemáticos de extracción electroquímica de cloruros del hormigón. Describiremos brevemente algunos de ellos.

- Modelo matemático de extracción electroquímica publicado por Polder y col., 1993

La eficiencia de la técnica de EEC se puede definir como la cantidad de cloruro que pueden ser extraída por una cierta carga pasada a través del hormigón (*Polder*, 1993*)

Polder la describió como sigue:

$$C_{ext} = I \cdot t \cdot CRE \cdot G/F \quad (1.25)$$

C_{ext} Cantidad de cloruros extraídos por unidad de superficie

I: Densidad de corriente, referida a la superficie del acero

t: Tiempo de flujo de corriente

CRE: Factor de eficiencia de la extracción (igual al número de transporte del cloruro)

G: Factor de geometría (superficie del acero/ superficie del hormigón)

F: Constante de Faraday.

De acuerdo con la ecuación (1.25) la cantidad de cloruros extraídos por una cierta carga (I·t) es directamente proporcional al número de transporte del cloruro y a un factor geométrico. El último es debido al hecho de que los cloruros no pueden ser extraídos del hormigón por la vía más corta sino a través de caminos tortuosos en la matriz cementicia.

El número de transporte del cloruro depende de los parámetros fundamentales químicos que afectan a la movilidad de iones: la carga y la concentración de los iones en la disolución de los poros. Define la cantidad de corriente transportada por estos iones con relación a la corriente total. Aumenta, y por tanto también lo hace la eficiencia, cuando la concentración de iones cloruro es alta y la de otros iones con carga negativa es baja.

- Modelo matemático de extracción electroquímica publicado por Andrade y col., 1995

Fue desarrollado siguiendo los principios electroquímicos clásicos. Así, el movimiento de cloruros durante la extracción, puede modelizarse mediante ecuación de Nernst-Planck, especialmente aplicada a las condiciones límites de un proceso de desorción.

Para el caso de una concentración de cloruros constante en el hormigón, las soluciones matemáticas se dan en la literatura tanto para una operación potenciostática como galvanostática.

- a) En condiciones potencioestáticas, el gradiente de concentración a lo largo del experimento viene dado por:

$$C_x = C_i \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right) \quad (1.26)$$

- b) y en condiciones galvanostáticas:

$$C_x = C_i - \frac{It_{Cl}}{n FAD} \left[2 \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{x^2}{4 Dt} \right) - x \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (1.27)$$

Siendo:

C_x : Concentración de cloruro en función del t y de x

C_i : Concentración superficial

I: Intensidad de corriente

D: Coeficiente de difusión

x: Profundidad

t: tiempo de exposición

F: Cte de Faraday

n: número de electrones transferidos

A: Área del electrodo

- c) Cuando los cloruros penetraron desde el exterior siguiendo un proceso no estacionario, se desarrolló un programa de ordenador usando diferencias finitas. Se demostró que es posible calcular la duración del tratamiento electroquímico a partir de: a) el valor del coeficiente de difusión del cloruro durante el proceso de intrusión o, b) de un valor práctico inicial para averiguar la difusividad real que gobierna el proceso.

- Modelo matemático de extracción electroquímica publicado por Castellote y col., 2000

Este estudio está basado en el trabajo anterior, realizado por los mismos autores (Andrade, 1995).

Debido al aumento de la concentración de ión hidróxido generado como consecuencia de la reacción catódica de electrolisis del agua, el coeficiente de difusión de iones cloruros disminuyó durante los experimentos de extracción de cloruros.

Basándose en ecuaciones anteriores, se llevó a cabo en este artículo el modelo matemático de extracción. Este modelo permite el cálculo del tiempo necesario para lograr un porcentaje particular de extracción de cloruros en función de la carga que pasa, así como también el perfil del cloruro restante en el hormigón. Se dan ejemplos numéricos en casos donde los cloruros se distribuyen homogéneamente para ilustrar el modelo. Estos resultados están de acuerdo con los ya publicados por otros autores.

- Modelo matemático de extracción electroquímica publicado por Wang y col., 2001

Los autores presentan un modelo bidimensional, realizado con ordenador, para simular la extracción de cloruro del hormigón por un proceso electroquímico (*Wang, 2001*). El modelo considera no solo los efectos de la unión electrostática de iones cargados en una mezcla multi-componente, sino también la influencia de otros factores, como la absorción de iones en la interfase entre el electrolito líquido y las fases sólidas de cemento debido a uniones iónicas, efectos de porosidad y de estrechamiento de la estructura porosa. El modelo proporciona un sistema de ecuaciones no lineales de convección-difusión con coeficientes variables que se resolvieron utilizando el método de elementos finitos de Galerkin.

En este modelo se discuten también los efectos producidos por la densidad de corriente aplicada externamente, tiempo de tratamiento, y la posición del ánodo sobre la eficiencia de la EEC. Los resultados numéricos mostraron que la posición del ánodo juega un papel importante en la extracción de cloruro. También, se considera que el proceso electroquímico no solo reduce la concentración de iones cloruro, sino que también aumenta la concentración de iones hidróxido cerca del acero.

En nuestro trabajo no se han utilizado modelos matemáticos para predecir la eficiencia de la EEC. Hemos hecho referencia a aspectos prácticos, tales como: efecto de las paradas, del punto de toma de muestra, del tipo y disposición del ánodo y de la disposición geométrica de las armaduras. Por tanto, hemos determinado la eficiencia experimentalmente.

1.4.5. Comportamiento a largo plazo.

Como es sabido cuando los cloruros son extraídos a través de la superficie, mediante EEC, estos nunca son extraídos completamente. Existe el riesgo de que los cloruros que permanecen en el hormigón puedan retroceder, por difusión, hacia la armadura y estimular un proceso de corrosión posterior. Cuántos cloruros se difunden, en qué tiempo y desde qué distancia depende, naturalmente, de un número de parámetros, como son: el volumen y diámetro de los poros capilares del hormigón, el secado de los poros y el grado de fijación de los cloruros por parte del hormigón. La difusión ocurre más lentamente cuanto más tortuosa y seca está la red de poros. En condiciones idénticas de almacenamiento, cuanto más poroso sea el hormigón (mayor a/c) se seca más rápidamente que un hormigón con baja porosidad (baja a/c), de forma que los cambios en la velocidad de difusión no son afectados de la misma manera en hormigones diferentes. Por tanto, no es posible predecir, basándose en la formulación de

un hormigón, cuan rápidamente van a ser transportados los iones disueltos en un hormigón seco.

Debido a la dificultad de extraer cloruros por detrás del refuerzo, existe el riesgo de que el cloruro existente en esas zonas se mueva por difusión después del tratamiento y alcance la armadura, produciendo concentraciones de cloruros alrededor de las barras superiores a los límites permitidos.

Bennett y col (*Bennett**, 1993) estudiaron el comportamiento en losas transcurridos 40 meses de la finalización del tratamiento, no obteniendo redistribuciones apreciables. Las experiencias se realizaron con contenidos muy pequeños de cloruros detrás del refuerzo. Con hormigones muy contaminados por detrás de las armaduras, podrían darse redistribuciones importantes de cloruros.

Polder y col. (*Polder*, 1993 y 1994) obtuvieron redistribuciones de cloruro similares a las debidas a un proceso de difusión, después de aplicar el tratamiento a un conjunto de prismas de hormigón que se expusieron posteriormente al exterior.

1.4.6. Aspectos prácticos de la aplicación de la EEC

La EEC es un método indicado como tratamiento preventivo. Esto significa un amplio campo de aplicación en estructuras donde los niveles de concentración de cloruros no exceden a los críticos y, consiguientemente, la corrosión todavía no se ha iniciado.

Antes de proceder a la ejecución del tratamiento hay que realizar una inspección preliminar de la estructura en la que debe determinarse:

- Recubrimiento del hormigón. Se debe medir el espesor medio del recubrimiento y sus variaciones. Grandes variaciones en el espesor disminuyen la eficiencia de los tratamientos electroquímicos. Cuando la variación es muy grande no es posible utilizar estos tratamientos.
- Contenido y distribución de ión cloruro.
- Estado de la corrosión del acero.
- Continuidad eléctrica de la armadura. Es necesaria para poder aplicar los tratamientos. Si existen discontinuidades deben corregirse con conexiones adicionales.
- Continuidad eléctrica del hormigón. Se precisa una continuidad electrolítica uniforme en el hormigón situado entre la armadura y el ánodo exterior. Las grietas, delaminaciones o reparaciones anteriores con morteros de polímero de alta resistividad impiden un flujo de corriente uniforme.

- Presencia de áridos potencialmente reactivos. Debe investigarse la reactividad de los áridos del hormigón porque la reacción árido-álcali se puede ver estimulada por el incremento del contenido en álcalis que producen estos tratamientos.
- Presencia de aceros pretensados. Con fuertes polarizaciones catódicas el hidrógeno puede penetrar en el acero y fragilizarlo por lo que se hace necesario un estudio previo en estructuras con este tipo de acero.

Antes de comenzar un tratamiento electroquímico debemos elegir el sistema que funcionará como ánodo, determinar los parámetros del proceso, cómo controlar el tratamiento y el criterio de finalización del mismo.

A) Sistema que funciona como ánodo

Se compone de un ánodo, un sistema que conduce la corriente y un electrolito. El ánodo tiene aproximadamente la misma extensión que la superficie de la estructura a tratar y debe conducir la corriente. Se suelen utilizar mallas de un material inerte como el titanio. El ánodo se puede disponer de varias formas, o envuelto por capas de electrolito sólido, o sumergido en electrolito líquido. En los estudios realizados en el presente trabajo se utilizó agua como electrolito.

Uno de los principales problemas asociados con las primeras aplicaciones de la EEC fue el uso de electrolitos líquidos (*Slater, 1976; Morrison, 1976*) los cuales complicaban o impedían la aplicación de la EEC al enfrentarse a superficies de hormigón curvas o verticales o inclinadas. Este problema fue solventado, usando electrolitos sólidos como capas adherentes a la superficie del hormigón: pinturas conductoras, gel, hormigón gunitado (*Vennesland, 1986*), o mezcla de pasta de celulosa embebiendo al ánodo (*Vennesland, 1990*), o conteniendo partículas de carbón, para incrementar la conductividad y para ayudar a igualar la distribución de corriente dentro del electrolito sólido (*Roper, 1993*). Otra propuesta fue el uso de un sistema anódico integrado que consistía en un sistema polimérico poroso embebiendo al ánodo (*Lankard, 1975; Bennett, 1994*) cuya forma más simple consistía en una disposición de sandwich con dos capas de bayetas embebiendo un material anódico flexible que se adapta a la forma de la superficie.

B) Parámetros del proceso

Los parámetros que controlan el proceso son la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento.

En principio es equivalente una densidad de corriente pequeña en un largo período de tiempo y una densidad de corriente alta en un corto período de tiempo, siempre que la carga total sea la misma en ambos casos.

La cantidad de cloruro extraído viene dada por la carga total que ha pasado entre el ánodo y el cátodo y la eficiencia de la extracción. Se puede reducir el 50% del contenido inicial de cloruro pasando una carga total de $5 \cdot 10^6 \text{C/m}^2$ (*Elsener, 1993*). Otros autores han estudiado la influencia de la densidad de carga en la eficiencia de la EEC (*Castellote, 1999*). La cantidad de carga total pasada, en nuestro trabajo, fue de $5 \cdot 10^6 \text{C/m}^2$ y en uno de los estudios de $10 \cdot 10^6 \text{C/m}^2$.

Se ha encontrado en la bibliografía diferentes densidades de corriente utilizadas en diversos trabajos de investigación. Polder y col. utilizaron densidades de corriente entre $0.6-4 \text{ A/m}^2$ (Polder, 1994). Tritthart realizó una experiencia de EEC aplicando una densidad de corriente de 1 A/m^2 (Tritthart, 1995). Tang y col. utilizaron 0.7, 1.0 y 1.3 A/m^2 (Tang, 1995). Otros autores realizaron experiencias de EEC, aplicando densidades de corriente entre $1-5 \text{ A/m}^2$ (Ihekwaba, 1996; Bertolini, 1996; Ihekwaba, 1998; Castellote, 1999). Se usan densidades de corriente de $1-5 \text{ A/m}^2$ respecto a la superficie de hormigón, con duraciones que oscilan entre unas pocas semanas y unos pocos meses dependiendo del contenido inicial de cloruros, la distribución de cloruros en el hormigón, el origen de los cloruros, la calidad del hormigón, la distribución de las armaduras y la distribución de la corriente.

C) Control del tratamiento

Para controlar la evolución del tratamiento, se pueden hacer perfiles de cloruros sobre testigos, en las diferentes etapas, e ir analizando la variación de la concentración de cloruros.

D) Criterio de finalización del mismo

Los criterios que aparecen en la bibliografía consultada hacen relación a la disminución de la concentración de cloruros por debajo de un valor crítico, pero no se hacen valoraciones acerca de la velocidad de corrosión de la armadura en el caso en el que el refuerzo estuviera corroyéndose. A este criterio de finalización debería añadirse la determinación del estado de corrosión de las armaduras por técnicas de extracción electroquímica.

1.4.7. Efectos colaterales de la EEC

La EEC tiene algunos efectos colaterales, que pueden resultar perjudiciales para la durabilidad del hormigón, los más importantes son:

- Reacción árido silíceo-álcali
- Reducción del enlace entre acero y hormigón
- Evolución de hidrógeno y fragilización del acero de refuerzo

1.4.7.1. Reacción árido silíceo-álcali

Un aumento en la concentración de OH^- en la disolución intersticial alrededor del refuerzo tiene un efecto positivo en términos de protección frente a la corrosión. Sin embargo en el caso de un hormigón que contenga partículas de árido silíceo reactivo, esto puede resultar peligroso porque puede iniciar o acelerar el daño debido a la reacción árido silíceo-álcali.

Para estudiar esta cuestión, Bennett y col (*Bennett, 1993*) realizaron ensayos en hormigones elaborados con áridos reactivos a los que sometieron a condiciones muy adversas: densidad de corriente 6 A/m^2 y carga total de $10 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$ y una disolución de borato sódico muy concentrada (0.3 M) como electrolito exterior. Bajo estas condiciones se desencadenó la reacción árido-álcali, produciéndose el agrietamiento del hormigón. Empleando como electrolito exterior una disolución 0.1 M de borato de litio, la reacción no se desencadenó, por la formación de un silicato insoluble de litio muy poco propenso a la expansión.

1.4.7.2. Reducción de la adherencia entre el acero y el hormigón

Es conocido, a partir de estudios llevados a cabo en el contexto de la protección catódica que la fuerza de enlace entre el acero de refuerzo y el hormigón podía ser dañada por la acción de la corriente continua. Los cambios en la fuerza de enlace entre el acero y el hormigón que ocurren durante la EEC fueron investigados por Bennett y col (*Bennett, 1993*) en prismas de hormigón que contenían cloruros a los que se les hizo pasar distintas densidades de corriente (0.02, 1 y 5 A/m^2) y densidades de carga ($7.2 \cdot 10^5$, $1.8 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$ y $7 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$) a través de la armadura. La resistencia última a la adherencia se redujo en una medida de un 11% pero no se detectó una influencia de la densidad o de la carga pasada en el valor de la reducción

Ihekwaba y col. (*Ihekwaba, 1996*) comprobaron que la aplicación de la EEC a hormigones armados altera la adherencia entre hormigón y acero. Se emplearon muestras con dos cantidades de cloruro (1.7 y 3.0% respecto a la masa de cemento) a las que se hizo pasar dos densidades de carga ($3.6 \cdot 10^3$ y $1.08 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$ respecto a la superficie de hormigón) durante 8 semanas. La reducción en los valores de adherencia dependió de la densidad de corriente aplicada y de la cantidad de cloruros presentes en el hormigón.

Vennesland y col. (*Vennesland, 1996*) obtuvieron reducciones significativas en la tensión de adherencia (de hasta el 60%) durante un tratamiento de EEC empleando un rango de densidades de carga entre $2 \cdot 10^6$ y $18 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$ de superficie de acero. Sorprendentemente la tensión aumentó para cargas de $36 \cdot 10^6 \text{ C/m}^2$.

El descenso de la fuerza de enlace es causado por los cambios en la composición de la matriz cementicia endurecida que ocurre por acción de la corriente aplicada, como es la gran acumulación de hidróxido alcalino alrededor del cátodo. Esto puede conducir a un debilitamiento de la matriz cementicia y por tanto a una pérdida de enlace. Page y col. (*Page, 1994*) observaron que la concentración de SO_4^{2-} y Cl^- aumentó en la disolución de los poros alrededor del cátodo durante el paso de corriente (5 A/m^2 y 12 semanas). De lo cual dedujeron que la estabilidad de los sulfatos y cloroaluminatos era debilitada por la alta concentración local de álcalis. Sugirieron también que la composición de la fase S-C-H era modificada por la entrada de iones Na^+ y K^+ , respectivamente. A su vez, Bennett y col. observaron una desintegración de las fases que contienen azufre en el hormigón causada por el aumento de la concentración de hidróxidos alcalinos (*Bennett, 1993*). El microscopio electrónico reveló un marcado aumento en la concentración total de sodio y azufre alrededor del refuerzo. Los autores

encontraron claras evidencias de depósitos de compuestos ricos en azufre y sodio en los poros de la matriz cementicia endurecida. También encontraron un significativo aumento en la porosidad de la pasta cementicia con una mayor proporción de poros entre 1 y 10 μm que la pasta no polarizada.

1.4.7.3. La fragilización del acero por absorción de hidrógeno.

Debido a la polarización negativa en el acero, se produce la formación de átomos de hidrógeno en su superficie. Estos se difunden hacia el interior, uniéndose para formar hidrógeno H_2 gas en las imperfecciones y huecos característicos de la red tridimensional de átomos de hierro. La acumulación de hidrógeno conlleva un efecto negativo debido a la presión ejercida en las paredes por el mismo.

Bennett y col. estudiaron si la evolución de hidrógeno resulta peligrosa para el refuerzo, en las condiciones en que habitualmente se desarrolla la EEC (*Bennett, 1993*). Ensayaron, a tracción con velocidad constante, barras de acero entalladas, que previamente habían sido sumergidas en una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada y se polarizaron catódicamente.

Observaron que con las densidades de corriente normalmente aplicadas en la EEC, no tenía una influencia significativa en la carga última de rotura del acero. Sin embargo, se produjo una reducción en la elongación de ruptura al 80% del correspondiente a las muestras que no habían sido polarizadas. Aparentemente, se había absorbido el suficiente hidrógeno como para poder cambiar las propiedades mecánicas del acero, aunque ensayos posteriores mostraron que se restauró bastante deprisa buena parte de la capacidad de alargamiento máximo, hasta valores del 90% del primitivo, cuando se cortó la corriente. A tenor de los resultados anteriores podría pensarse en una rápida liberación del hidrógeno absorbido por el acero. Así, mientras que el flujo de corriente no había tenido influencia en la resistencia, si que la tenía en las propiedades plásticas del acero de refuerzo, esto obliga a reducir al máximo las cargas dinámicas durante el tratamiento.

De todas formas, con carácter general, los autores concluyeron que las densidades de corriente y las cargas habitualmente recomendadas para la extracción de cloruros no tenían un efecto negativo sobre el acero..

1.5. Métodos electroquímicos utilizados para el estudio de la corrosión

1.5.1. Medida de potencial de corrosión

La corrosión de un metal en medio acuoso, como es el caso de la armadura dentro del hormigón, es un fenómeno que engloba dos semirreacciones de oxidación-reducción, por un lado la oxidación del Fe a Fe^{2+} , y por otro lado la reducción del oxígeno. La intensidad del proceso anódico y del proceso catódico son iguales, y son identificadas como la intensidad de corrosión del proceso, I_{corr} , que es la magnitud eléctrica utilizada como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y de la del medio. A este potencial al que se encuentra el metal se le denomina potencial mixto o de corrosión, E_{corr} .

La medida de potencial de corrosión consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del hormigón.

El E_{corr} no cuantifica la proporción de metal que se corroe por unidad de área. Por ello estos valores no deben considerarse más que como valores orientativos y de validez estrictamente cualitativa, sin que se pueda establecer de una forma general y para cualquier condición de exposición una relación constante entre E_{corr} y la cinética del proceso.

La interpretación de las medidas de potencial de corrosión se suele hacer calificando el riesgo según el criterio (*Norma ASTM C-876-91*):

E_{corr} (SCE)/mV	Riesgo de corrosión
> -200	10%
-200 a -350	50%
< -350	90%

1.5.2. Medida de resistividad

La medida de la resistividad del hormigón ayuda a interpretar el valor de la velocidad de corrosión I_{corr} , ya que está íntimamente relacionada con el contenido de

humedad del hormigón. El parámetro normalmente medido con las distintas técnicas es la resistencia eléctrica del hormigón (R_e), utilizándose normalmente como unidad de medida el $K\Omega$. La resistividad se calcula a partir de la R_e teniendo en cuenta el factor geométrico. Sus unidades son por tanto $K\Omega \cdot cm$.

Se han establecido distintos rangos gracias a la experiencia en laboratorio, en relación con la probabilidad de corrosión (Alonso, 1988) (Feliú, 1989):

Resistividad

> 100-200 $K\Omega \cdot cm$

50-100 $K\Omega \cdot cm$

10-50 $K\Omega \cdot cm$

< 10 $K\Omega \cdot cm$

Probabilidad de corrosión

No permite distinguir entre acero en estado activo o pasivo de corrosión. Las velocidades de corrosión I_{corr} serán muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

Velocidades de corrosión bajas

Velocidades de corrosión moderadas o altas, en hormigones carbonatados o con cloruro

La resistividad no es el parámetro controlante del proceso. El valor de I_{corr} obtenido reflejará la cota superior de la velocidad de corrosión en ese hormigón para un determinado contenido de cloruros o un nivel de carbonatación

1.5.3. Medida de la velocidad de corrosión a través de la Resistencia de polarización

La resistencia de polarización es una técnica que fue descrita a finales de la década de los 50 (Stern, 1957). Se trata de una técnica cuantitativa y no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio. Es la técnica más utilizada para medir la velocidad de corrosión en las armaduras del hormigón armado, aunque tiene algunas limitaciones. El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión. En la práctica se aplica una pequeña polarización, ΔE , de ± 10 mV y se mide la densidad de corriente resultante, ΔI , dando nombre al método el hecho de que las dimensiones del cociente $\Delta E/\Delta I$ sean las de una resistencia.

La resistencia de polarización está relacionada con la velocidad de corrosión instantánea a través de la fórmula de Stern (*Stern, 1957*), que referida a la unidad de superficie es:

$$I_{corr} = B/R_p$$

Las unidades habituales en las que se expresa la velocidad de corrosión son $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

El valor de B puede variar entre 13 y 52 mV en la mayoría de los sistemas metal-medio. En el hormigón armado se asumen valores de 26 mV para el acero activo y de 52 mV para el acero pasivo.

Los primeros autores que aplicaron esta técnica a probetas de hormigón armado (*Andrade, 1973*), y posteriormente, (*Andrade, 1977*) (*González, 1977*) encontraron una relación cuantitativa aceptable entre las estimaciones electroquímicas deducidas de la fórmula de Stern y las pérdidas de peso de los aceros obtenidas por vía gravimétrica.

La ventaja de este método, reside en que las polarizaciones aplicadas son tan pequeñas que no alteran prácticamente el electrodo en el proceso de medida. Por tanto, una sola probeta permite innumerables medidas y seguir el proceso de evolución con el tiempo. Es además lo suficientemente exacto como para distinguir, sin riesgo de error, entre las condiciones de las variables aceptables e inaceptables, ya que circunstancias tales como la carbonatación o la presencia de cloruros, pueden hacer aumentar la velocidad de corrosión en algunos órdenes de magnitud (*Andrade, 1977*)

La principal utilidad del método, es que determinando la velocidad instantánea de corrosión en función del tiempo, es posible determinar la vida residual de la estructura, en el momento de la medida, considerando que se puede conocer la pérdida de sección ocurrida antes del momento de la medida.

La interpretación de las medidas de velocidad de corrosión con relación al nivel de corrosión ha sido determinada a partir de una experiencia previa en laboratorio (*Andrade, 1977*), (*Andrade, 1978*), (*Andrade, 1990*) que luego fue comprobada para la utilización de la técnica in situ (*J. Rodríguez, 1993*) es la siguiente.

<u>Velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)</u>	<u>Nivel de corrosión</u>
< 0.1	Despreciable.
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1	Moderada
>1	Alta