

manual

inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras

programa temático del
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
“Corrosión y protección de materiales”

Coordinador: S. FELIU
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas

subprograma: **“Corrosión de armaduras”**

Obra coordinada por: C. ANDRADE

Instituto Eduardo Torroja de
Ciencias de la Construcción

manual

inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras

**programa temático del
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
“Corrosión y protección de materiales”**

Coordinador: S. FELIU
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas

subprograma: “Corrosión de armaduras”

Obra coordinada por: C. ANDRADE
Instituto Eduardo Torroja de
Ciencias de la Construcción

PROLOGO

La Junta de Gobierno del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) aprobó, en abril de 1986, la creación de Programas Temáticos que estimularan el encuentro de especialistas del CSIC con otros pertenecientes tanto a entes privados como públicos, con la finalidad de crear un entramado de intercambios que facilitara una mayor permeabilidad de los conocimientos científicos. Uno de los Programas Temáticos que obtuvo subvención del CSIC fue el de «Corrosión y Protección de Metales» del que fue nombrado Coordinador el Dr. Sebastián Feliú, Jefe de la U.E.I. de «Corrosión y Protección» del CENIM.

Dentro de este Programa Temático se decidió desarrollar tres subprogramas, uno de los cuales es el de «Corrosión y Protección de Armaduras» coordinado por la Dra. M.^a Carmen Andrade del Instituto Eduardo Torroja. Como una actividad dentro de éste Subprograma surgió la redacción del presente Manual dado el vacío de publicaciones similares en lengua castellana.

Aunque el número de publicaciones y congresos sobre la problemática de la corrosión es en la actualidad muy numeroso debido a que este fenómeno es el causante del mayor número de fallos prematuros del hormigón, son muchos los aspectos que quedan por resolver y pocas las publicaciones con vertiente práctica y lenguaje no muy especializado. Asimismo, aunque es muy variada la oferta de materiales y sistemas de reparación, en algunos casos, las intervenciones efectuadas presentan una durabilidad incluso inferior a la que tuvo la estructura primitiva. En ocasiones un dictamen erróneo o incompleto sobre las causas de la corrosión es el motivo del inadecuado comportamiento de las reparaciones.

El presente Manual va dirigido principalmente a técnicos especializados y laboratorios que tienen que intervenir en el dictamen de la situación de deterioro de estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión de armaduras.

No se abordan en él aspectos de comportamiento estructural, ya que exigiría mucha mayor extensión que la que se ha pretendido. El enfoque es fundamentalmente de comportamiento del material. Tampoco se comentará la problemática del hormigón pretensado, por ser la corrosión bajo tensión un fenómeno muy específico, objeto todavía de controversias científicas y además por existir ya en fase muy avanzada un documento redactado por la ATEP sobre conservación y mantenimiento de obras pretensadas. La descripción del fenómeno sí se comenta, sin embargo, en el capítulo primero.

El Manual comienza con un resumen recordatorio de los factores principales a los que se pueden deber los daños prematuros por corrosión de armaduras, para seguir con algunas indicaciones de cómo se deben realizar las inspecciones, y de los ensayos y la metodología que se recomienda realizar para poder dictaminar con precisión las causas de daño.

A continuación se hacen una serie de comentarios sobre la vida residual de estructuras dañadas, sobre el riesgo de corrosión futura, el seguimiento necesario de una estructura reparada y una breve enumeración de métodos de reparación y consideraciones básicas a tener en cuenta en la recomendación de un determinado método. Se aporta una breve relación bibliográfica.

Finalmente se incluyen en forma de ficha la descripción de algunos casos de corrosión de armaduras detectados en nuestro país.

La redacción de documento se ha debido a un esfuerzo colectivo de los integrantes del Subprograma Temático del CSIC que se enumeran a continuación por orden alfabético:

- | | |
|------------------------------------|---|
| M. ^a CRUZ ALONSO ALONSO | - Instituto Eduardo Torroja
MADRID |
| Juan José ALVAREZ COLOMER | - Laboratorio del Servicio de Calidad y Tecnología de la Edificación y Obras Públicas
SANTA CRUZ DE TENERIFE |
| José Manuel ALVAREZ ILARRI | - Laboratorio de Control (INCE)
LA CORUÑA |
| Bernardo BACLE GONZALEZ | - Instituto Eduardo Torroja
MADRID |
| Alfonso CIENFUEGOS JOVELLANOS | - Laboratorio Asturiano Control Edificación (LACE)
OVIEDO |
| Gabriel CORTES JAUME | - Laboratorio para la Calidad de la Edificación
PALMA DE MALLORCA |
| José María COSTA TORRES | - Facultad de Química
Universidad de Barcelona
BARCELONA |
| José Eduardo DOMINGUEZ | - Laboratorio del Servicio de Calidad y Tecnología de la Edificación y Obras Públicas
LAS PALMAS G.C. |
| M. ^a Lorenza ESCUDERO | - C.E.N.I.M.
MADRID |

- José Manuel FERNANDEZ PARIS – Instituto Técnico de Materiales y Construcciones
MADRID
- Antonio DE LA FUENTE SANCHEZ – Laboratorio de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda
HOSPITALET DE LLOBREGAT (BARCELONA)
- Ramón GUERRA MUÑOYERRO – Centro de Control de Calidad de la Edificación
VALLADOLID
- Miguel A. GUILLEN – Instituto Español de Corrosión
MADRID
- Mercedes GOMEZ ORTEGA – Instituto Eduardo Torroja
MADRID
- Angeles MACIAS GARCIA – Instituto Eduardo Torroja
MADRID
- Fernando MADRUGA REAL – Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación
SALAMANCA
- Ramón NOVOA RODRIGUEZ – E.T.S. Ing. Industriales de Vigo (Dpto. de Ingeniería Química)
VIGO
- Pilar TORMO GISBERT – Laboratorio de Ensayos del Colegio Oficial de Aparejadores
ALICANTE

Entre todos se han discutido mejoras al borrador original en cuya redacción han participado más activamente, también por orden alfabético.

- José María BARCENA DIEZ – LABEIN-Torrontegui
BILBAO
- Francisco GARCIA OLMOS – Laboratorio de Ensayos del Colegio Oficial de Aparejadores
MURCIA
- Fernando GOMA I GINESTA – Universidad Politécnica de Barcelona
BARCELONA
- José Antonio GONZALEZ – C.E.N.I.M.
MADRID
- Bernardo PEREPEREZ VENTURA – Escuela Técnica Superior de Arquitectura
VALENCIA

José RODRIGUEZ MONTERO

– Laboratorio de Control de Calidad
en la Edificación
ALBOLOTE (GRANADA)

MADRID, 8 DE SEPTIEMBRE DE 1988

MARIA DEL CARMEN ANDRADE PERDRIX

INDICE

PROLOGO	5
Capítulo I: CONCEPTOS BASICOS SOBRE CORROSION DE ARMADURAS	11
I.1. Fundamentos sobre corrosión	11
I.2. Protección y durabilidad de las armaduras en el hormigón ..	15
I.3. Causas de la corrosión de las armaduras	16
I.4. Factores desencadenantes	20
I.5. Factores acelerantes	29
I.6. Efectos de la corrosión	35
I.7. Recomendaciones de buena práctica para aumentar la durabi- lidad de las armaduras	36
I.8. Métodos complementarios de protección	38
I.9. Bibliografía	46
Capítulo II: INSPECCION Y DIAGNOSTICO	49
II.1. Inspección preliminar	50
II.2. Inspección detallada	51
II.3. Diagnóstico	55
Capítulo III: ENSAYOS	57
III.1. Determinación de la resistencia mecánica	59
III.2. Determinación del espesor de recubrimiento y características de las armaduras	63
III.3. Porosidad y densidad	65
III.4. Contenido en cloruros	67
III.5. Contenido en sulfatos	69
III.6. Profundidad de carbontación	71
III.7. Contenido en humedad del hormigón	72
III.8. Resistividad eléctrica	74
III.9. Medida del potencial de corrosión	76
Capítulo IV: ALGUNAS INDICACIONES GENERALES DE COMO REDACTAR UN INFORME DE INSPECCION Y DIAGNOSTICO	81

Capítulo V: VIDA RESIDUAL DE UNA ESTRUCTURA DAÑADA POR CORROSION DE ARMADURAS	83
V.1. Estimación de la resistencia mecánica residual	83
V.2. Vida residual y riesgo de corrosión futura	85
Capítulo VI: RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE REPARACION	89
VI.1. Proceso de reparación	90
VI.2. Tipos de materiales de reparación	92
VI.3. Seguimiento de una estructura reparada	93
VI.4. Bibliografía	94
GLOSARIO DE TERMINOS SOBRE CORROSION	97
FICHAS DE CASOS REALES	110

CAPITULO I

CONCEPTOS BASICOS SOBRE CORROSION DE ARMADURAS

I.1. FUNDAMENTOS SOBRE CORROSION

Los metales se encuentran, en general, en la naturaleza formando compuestos (óxidos, sulfuros, etc.) con otros elementos. Para usarlos en su forma elemental hay que extraer el metal mediante un proceso de reducción, lo que requiere comunicarles cierta cantidad de energía. El proceso inverso por el que el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía de Gibbs, es decir, tiene lugar mediante una reacción espontánea. Este proceso, que corresponde a una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina del metal.

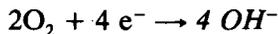
La corrosión metálica cuando tiene lugar en medio acuoso, es un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, supone la existencia de una reacción de oxidación y una de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. Así, sobre la superficie del metal, se generan dos zonas, de las cuales, donde se produzca la oxidación del metal, actuará de ánodo:



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. Esta sustancia serán los iones hidrógeno en medios ácidos:



y el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros:



El proceso de corrosión supone, pues, la generación de una pila electroquímica, tal y como muestra la figura I.1. La corrosión a través del metal y a través del electrolito entre el ánodo y el cátodo, supone el funcionamiento de un circuito cerrado. Si el circuito se interrumpe en alguno de sus puntos, la pila no puede funcionar y la corrosión se detiene.

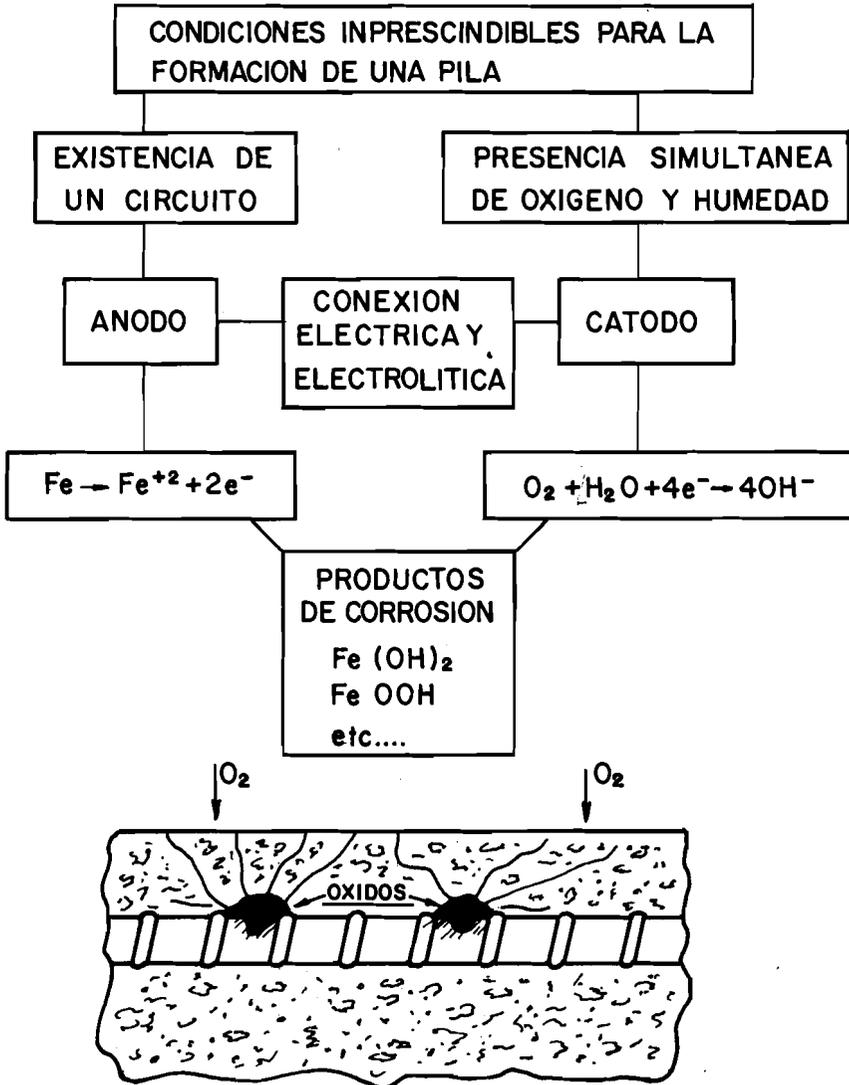
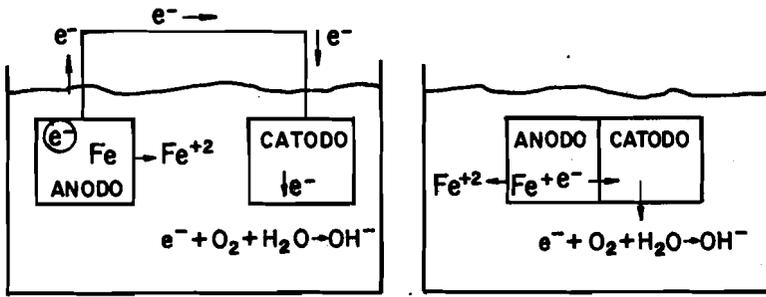


Figura I.1.—Formación de la pila de corrosión.

No todos los metales tienen la misma tendencia a oxidarse, ya que unos son más estables que otros, e, incluso, hay algunos, como los metales nobles que se conservan indefinidamente en su forma elemental. La llamada «serie electroquímica de los metales» los ordena según su tendencia a oxidarse (tabla I.1), tomando como cero arbitrario la oxidación de hidrógeno a protón.

POTENCIALES NORMALES DE ELECTRODO

Activo 	Ca^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Ca	- 2,76 V
	Mg^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Mg	- 2,34 V
	Al^{+3}	+	$3 e^{-}$	\rightleftharpoons	Al	- 1,67 V
	Zn^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Zn	- 0,76 V
	Fe^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Fe	- 0,44 V
	Sn^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Sn	- 0,14 V
	Pb^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Pb	- 0,13 V
Noble	2H^{+}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	H_2	0,00 V
	Cu^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Cu	+ 0,34 V
	Ag^{+}	+	e^{-}	\rightleftharpoons	Ag	+ 0,80 V
	Hg^{+2}	+	$2 e^{-}$	\rightleftharpoons	Hg	+ 0,85 V
	Au^{+3}	+	$3 e^{-}$	\rightleftharpoons	Au	+ 1,50 V

Al tener lugar la corrosión en medio acuoso, se pueden originar iones en disolución, los cuales pueden participar en reacciones de equilibrio con otros del medio, incluidos los del agua. De este modo, la reacción de corrosión depende de una serie de reacciones en las que intervienen, directa o indirectamente, los iones del agua, es decir, 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 E-pH, conocidos como diagramas de Pourbaix.

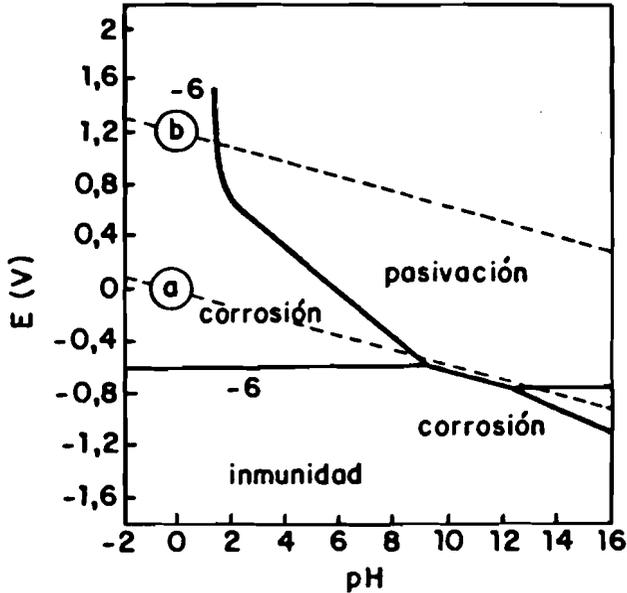


Figura I.2.—Diagrama simplificado de Pourbaix para el Fe a 25 °C.

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. En la figura I.2 se muestra el diagrama de Pourbaix para el Fe a 25° C. El estado definido como de «pasividad» y que por fortuna presentan diversos metales, supone que el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa de barrera impidiendo la posterior oxidación. El metal posee la apariencia de mantenerse inalterado. En cambio, el estado de «inmunidad» supone que 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.

Las formas que pueden adoptar la corrosión son diversas. En general, se clasifican por la extensión del área atacada. Los tipos de corrosión más frecuentes son: generalizada, localizada, por picaduras y fisurante, y se muestran en la figura I.3.

Finalmente, es necesario resaltar 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 proceder tan lentamente que a efectos de vida útil, sea despreciable. En la cinética del proceso corrosivo influye fundamentalmente además de la naturaleza del electrolito el contenido en oxígeno y la resistividad del medio.

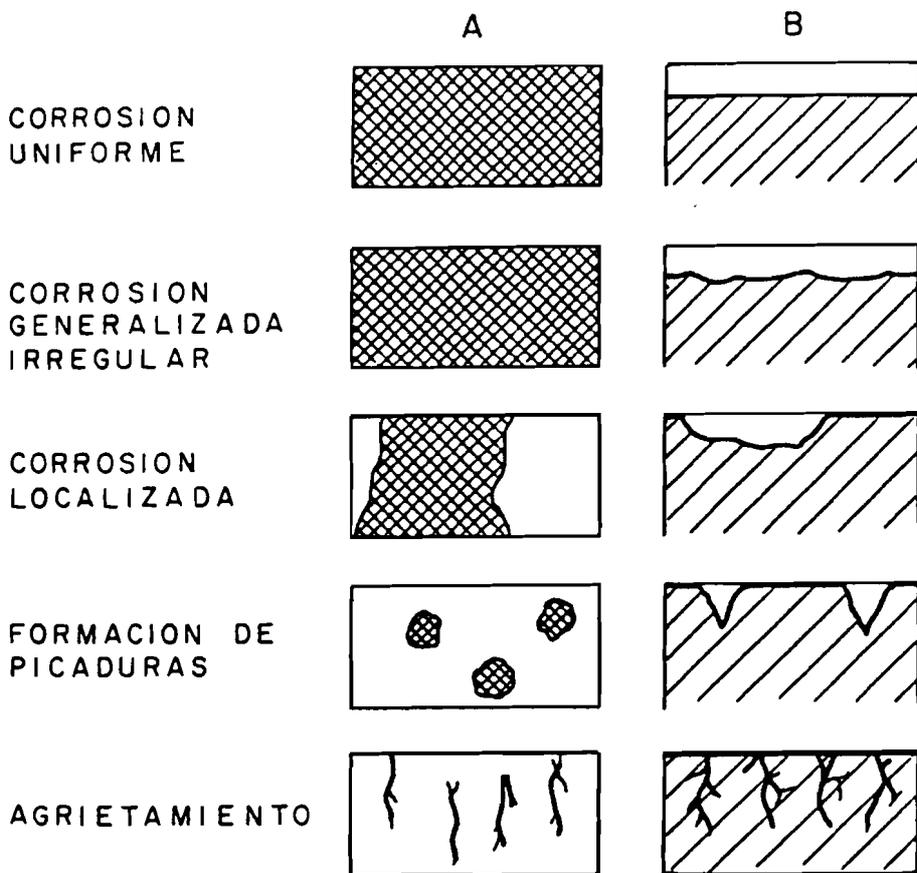


Figura 1.3.—Morfología de la corrosión.

I.2. PROTECCION Y DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS EN EL HORMIGON

El hormigón armado, además de aportar unas prestaciones mecánicas muy amplias, ha demostrado poseer una durabilidad adecuada para la mayoría de los usos a los que se le destina. Esta durabilidad de las estructuras de hormigón armado es el resultado natural de la acción protectora, de doble naturaleza, que el hormigón ejerce sobre el acero:

- por una parte, el recubrimiento de hormigón supone una barrera física,
- y por otra, la elevada alcalinidad del hormigón desarrolla sobre el acero una capa pasivante que lo mantiene inalterado por tiempo indefinido.

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

La alcalinidad del hormigón es debida principalmente al hidróxido cálcico que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que puedan estar incorporados como sulfatos en el clinker. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12,6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra pasivado, 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.

En la figura número I.4 se visualiza la situación habitual de las armaduras embebidas en hormigón.

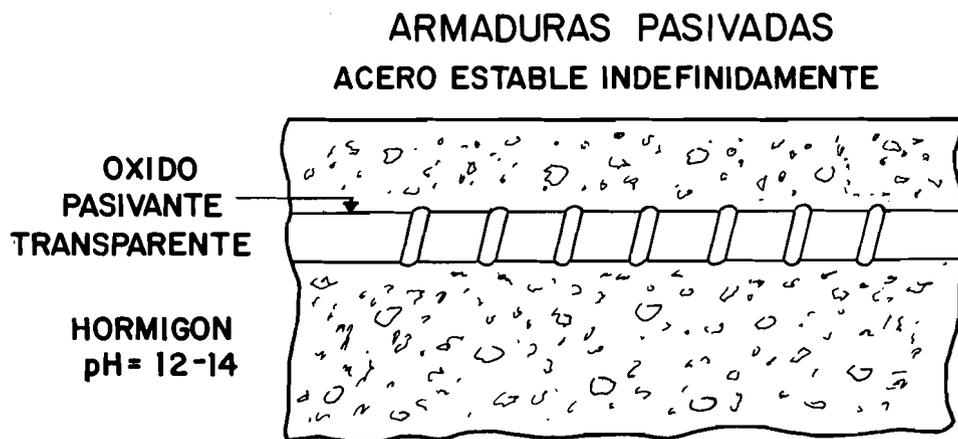


Figura I.4.—Armaduras embebidas en un hormigón sin contaminar.

I.3. CAUSAS DE LA CORROSION DE LAS ARMADURAS

No obstante todo lo mencionado, existen ambientes agresivos o sustancias que se añaden durante el amasado, que pueden provocar la corrosión de las armaduras. En la Tabla número I.2 se da la clasificación de agresividad ambiental según la propuesta de la PREN 206 del CEN.

CLASE DE EXPOSICION		CONDICIONES AMBIENTALES
① AMBIENTE SECO		Por ejemplo: Interior de edificios para viviendas u oficinas (1)
② AMBIENTE HUMEDO	ⓐ SIN HELADAS	Por ejemplo: - Interior de edificios con humedades elevadas ($\geq 60\%$) - Elementos exteriores. - Elementos en suelos o aguas no agresivos.
	ⓑ CON HELADAS	Por ejemplo: - Elementos exteriores expuestos a la helada. - Elementos en suelos o aguas no agresivos expuestos a la helada. - Elementos interiores cuando la humedad es alta expuesto a la helada.
③ AMBIENTE HUMEDO CON HELADA Y AGENTES DE DESHIELO		Por ejemplo: - Elementos interiores y exteriores expuestos a la helada y agentes de deshielo.
④ AMBIENTE MARINO	ⓐ SIN HELADAS	Por ejemplo: - Elementos completa o parcialmente sumergidos en agua de mar o en zona de mareas. - Elementos en ambiente saturado de sales (zona costera)
	ⓑ CON HELADAS	- Elementos parcialmente sumergidos en agua de mar o en la zona de mareas y expuestos a la helada. - Elementos en ambiente saturado de sales y expuesto a la helada.
LAS CLASES SIGUIENTES SE PUEDEN PRESENTAR SOLAS O EN COMBINACION CON LAS ANTERIORES:		
⑤ AMBIENTE QUIMICAMENTE AGRESIVO (2)	ⓐ	- Ambiente químico ligeramente agresivo (gas, líquido o sólido) - Atmósfera industrial agresiva.
	ⓑ	- Ambiente químico moderadamente agresivo (gas, líquido o sólido)
	ⓒ	- Ambiente químico altamente agresivo (gas, líquido o sólido)
<p>(1) Esta clase de exposición es válida solo en tanto en cuanto durante la construcción, la estructura o algunos de sus componentes, no está expuesto a condiciones mas severas durante un prolongado periodo de tiempo.</p> <p>(2) Ambientes químicamente agresivos son clasificados en ISO/ DP 9690. Las equivalencias en las condiciones de exposición son: Clase de exposición 5 a: Clasificación ISO A1G, A1L, A1S Clase de exposición 5 b: Clasificación ISO A2G, A2L, A2S Clase de exposición 5 c: Clasificación ISO A3G, A3L, A3S</p>		

TABLA I.2.—Clasificación de agresividad de ambientes según prEN 206

Esencialmente son dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivamente del acero:

- la presencia de una cantidad suficiente de cloruros (tanto porque se añadan durante el amasado como porque penetren desde el exterior), u otros iones despasivantes en contacto con la armadura, y
- la disminución de la alcalinidad de hormigón por reacción con sustancias ácidas del medio.

Como muestra la figura número I.5, los iones despasivantes dan lugar a una corrosión de tipo localizado, mientras que la reducción del pH permite la disolución completa de la capa pasivante y por lo tanto da lugar a una corrosión de tipo generalizado. En esta figura se alude también a otro tipo de corrosión, la corrosión fisurante bajo tensión, que aparece sólo en el hormigón pretensado o postensado, por lo que no se va a tratar en el presente Manual que se refiere a hormigón armado sólo.

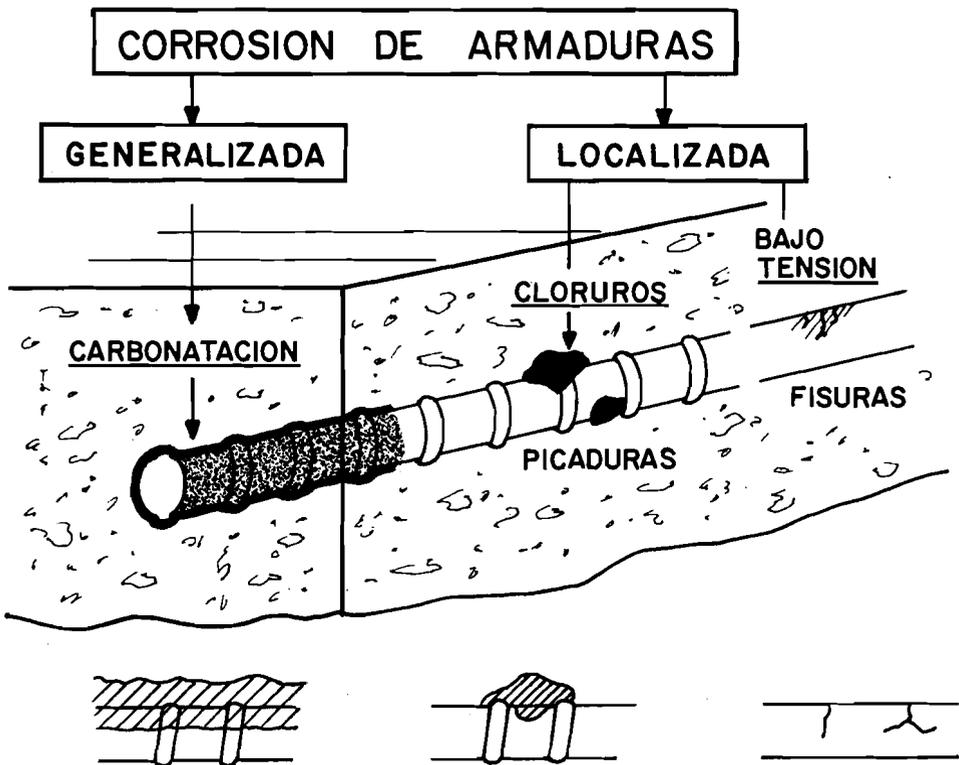


Figura I.5.—Tipos de corrosión de armaduras y factores que los provocan.

Las causas directas de que aparezcan fenómenos de corrosión bajo tensión no son aún bien conocidas, lo que hace que la inspección de obras de hormigón pre o postensado tenga una problemática muy particular que no se pretende abordar en el presente texto. El fenómeno no se presenta en hormigones sanos y de buena calidad; en general, los fallos se han asociado siempre a hormigones de baja calidad o la presencia de iones (como los sulfuros o el tiocianato) promotores en el acero de este tipo de ataque, cuando el metal está sometido a tensiones elevadas.

I.3.1. VIDA UTIL

Son diversas las definiciones de lo que se entiende por vida útil. Una de ellas sería: que es aquella durante la cual la estructura conserva todas las características mínimas de funcionalidad, resistencia y aspectos externos exigibles.

Relacionado con el posible ataque por corrosión de las armaduras, Tuutti propuso un modelo simplificado que se muestra en la Figura número I.6. En ella se representa en abscisas el tiempo y en ordenadas el grado de deterioro. Se define un período de iniciación que es el tiempo que tarda el agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación, y un período de propagación que comprende una acumulación progresiva del deterioro, hasta que se alcanza un nivel inaceptable del mismo. Este modelo es, por el momento, puramente cualitativo, aunque por su simplicidad descriptiva, es muy citado.

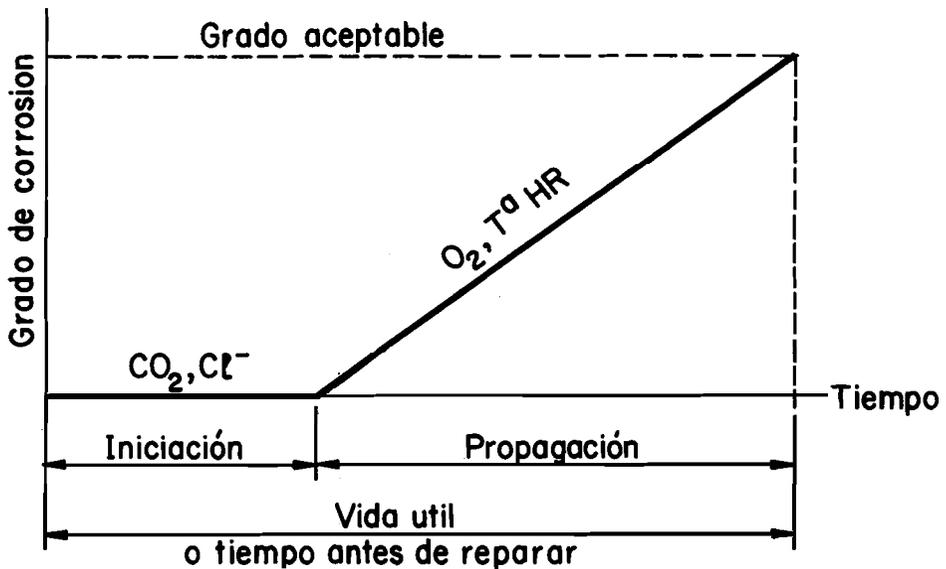


Figura I.6.—Modelo de vida útil de TUUTTI.

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

1.4. FACTORES DESENCADENANTES

1.4.1. CORROSION LOCALIZADA

En el cuadro adjunto (figura I.7) se resumen las circunstancias que pueden dar lugar a corrosión de tipo localizado. La situación más agresiva con diferencia y que es la responsable del mayor número de casos de corrosión de armaduras, es la presencia de cloruros. Los iones sulfuro y sulfato son también despasivantes, pero mucho menos frecuentes y peligrosos que los cloruros. El resto de las circunstancias enumeradas, tienen también una incidencia limitada, aunque son responsables en ocasiones de importantes deterioros.

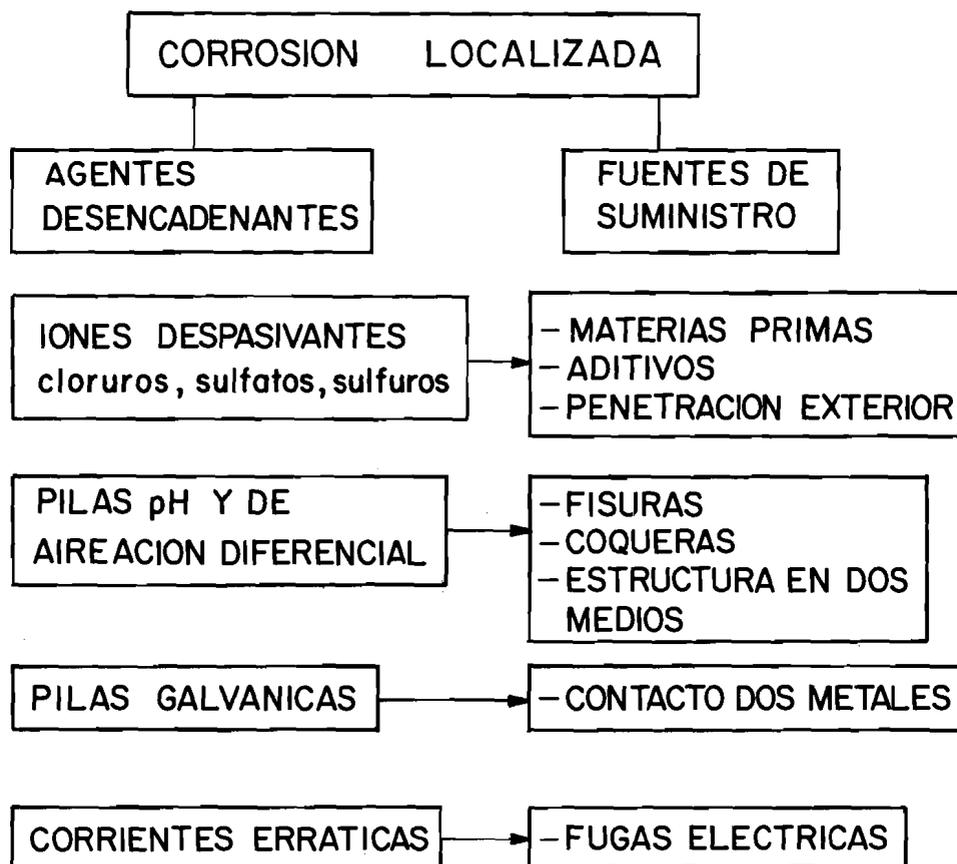


Figura I.7.—Factores que provocan corrosión localizada.

1.4.1.1. Cloruros

Estos iones tienen la propiedad de destruir de forma puntual la capa pasivante (figura número I.8), lo que provoca una corrosión conocida con el nombre de «por picaduras». Estos cráteres son el ánodo de la pila de corrosión, por lo que progresan en profundidad, pudiendo llegar a producir la rotura puntual de las barras.



Figura I.8.—Caso real de corrosión por cloruros (picaduras y disminución de sección) en un pilar.

Los cloruros pueden estar en el hormigón, bien porque se añadan con sus componentes (aditivos, agua, etc...), bien porque penetren desde el exterior a través de la red de poros. Esta última situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales de deshielo en carreteras o puentes, en climas fríos.

Todas las normativas limitan el contenido en cloruros en el hormigón fresco, que varían de unos países a otros (véase tabla I.3). 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: tipo de cemento (finura, contenido en yeso, contenido en aluminato tricálcido, etc.), proporción de cemento, relación a/c, contenido en humedad, etc. En la figura número I.9 se resumen las condiciones que pueden afectar al límite de cloruros capaz de despasivar las armadu-

CONTENIDO DE CLORUROS LIMITE PROPUESTO POR DIVERSAS NORMATIVAS (% EN PESO DE CEMENTO)			
HORMIGON	EN MASA	ARMADO	PRETENSADO
EH - 88	1,5 - 2	0,4	-
pr EN- 206	1	0,4	0,2
BS-8110-1985	-	0,2 - 0,4 *	0,1
ACI-318-83	-	0,15 - 0,3 - 1**	0,06
FIP-1985 (Design of concrete sea structures)	-	-	0,1
* El límite varía en función del tipo de cemento			
** El límite varía en función de la agresividad ambiental			

TABLA I.3.—

ras. Un valor medio generalmente aceptado es el de 0,4% en relación al peso de cemento ó 0,05 - 0,1% en relación al peso de hormigón.

En relación al límite de cloruros es necesario recordar que parte de los cloruros presentes en el momento del amasado se combinan con las fases aluminio-ferríticas para dar principalmente cloroaluminatos, que quedan formando parte de las fases sólidas del cemento hidratado. Sólo resultan peligrosos los cloruros que quedan disueltos en la fase acuosa de los poros. De todas formas, las normativas se refieren siempre al límite de cloruros «totales», porque los cloruros combinados pueden volver a la disolución por efecto de procesos como la carbonatación.

Aunque el hormigón no contenga cloruros inicialmente éstos pueden llegar hasta la armadura a través de la red de poros (véase figura número I.10), si la estructura está situada en ambientes marinos o si se añaden sobre la superficie del hormigón para evitar su helada. En estos casos, la cantidad de cloruros se va incrementando con el tiempo, pudiendo llegar a atacar toda la superficie de la armadura y provocar velocidades de corrosión muy peligrosas.

Además de por 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 transporte por fuerzas capilares, muy propio de ambientes de «niebla salina» existente en climas cálidos marinos, en los que los cloru-

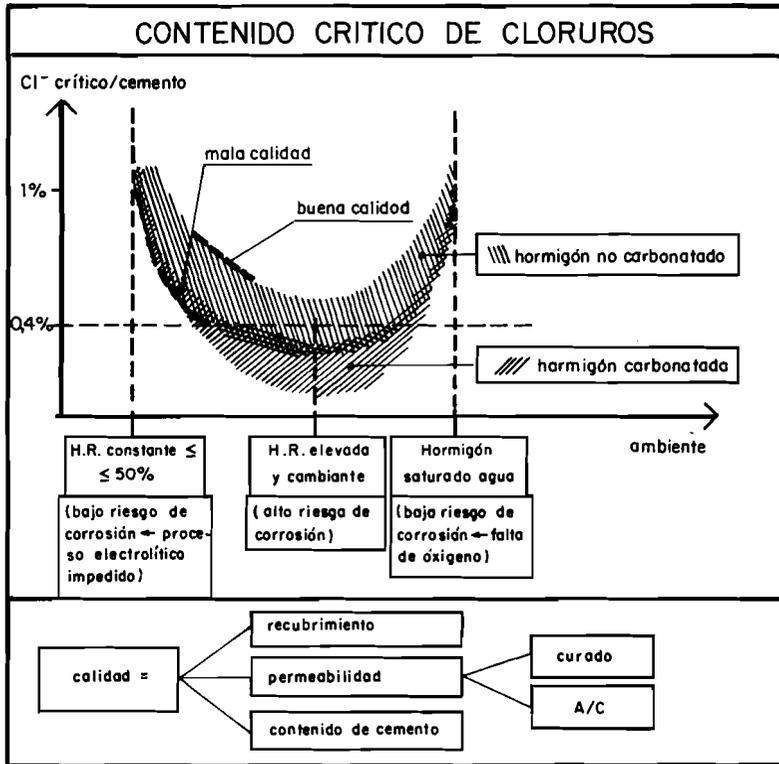


Figura I.9.—Esquema de variación del contenido crítico de cloruros en función de la calidad del hormigón y la humedad ambiental.

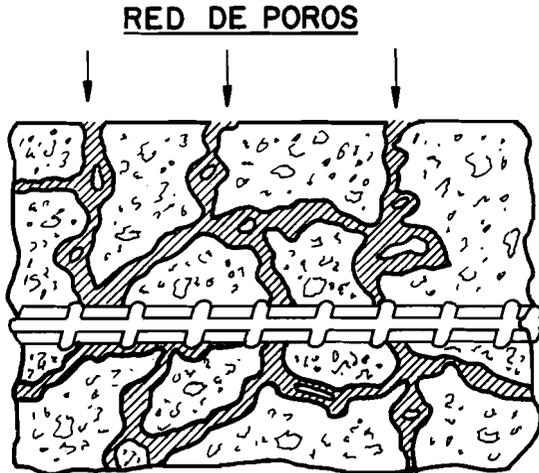


Figura I.10.—Visualización simplificada de la red de poros del hormigón.

ros están suspendidos en las gotitas de humedad del aire. En este fenómeno influyen mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

El tiempo que tardan los cloruros en llegar hasta la armadura o «período de iniciación» en el modelo de Tuutti, dependerá principalmente de:

- concentración de cloruros en el medio exterior,
- naturaleza del catión que acompaña al cloruro,
- calidad del hormigón: tipo de cemento, proporción de aluminato tricálcico, relación a/c, etc.,
- temperatura, y
- ancho y cuantía de las fisuras.

La profundidad que alcanzarán los cloruros cuando penetran por difusión en un determinado momento se ajusta aproximadamente a la ley: $x = K \sqrt{t}$, en la que x es la profundidad que alcanzan los cloruros en un tiempo t . La constante K depende de los factores recién enumerados.

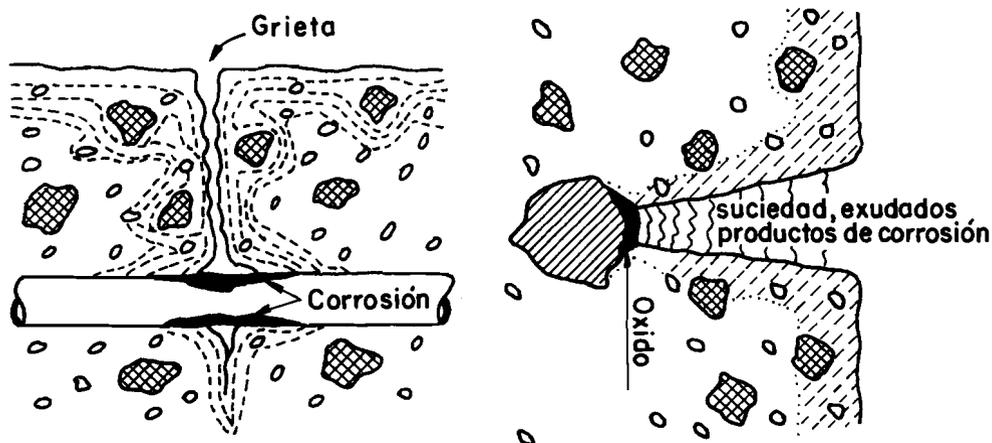


Figura I.11.—Corrosión en fisuras transversales y longitudinales.

1.4.1.2. Influencia de las fisuras

Las grietas inherentes al hormigón armado constituyen un camino rápido de penetración de los agresivos hasta la armadura. Como muestra la figura número I.11, cuando éstos la alcanzan se empiezan a corroer las zonas no recubiertas de hormigón que actúan de ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo.

Las normativas de los diferentes países y por tanto también la española EH-88 contemplan un ancho máximo admisible de las fisuras en la superficie que se sitúa en 0,3-0,4 mm para ambientes no agresivos y en 0,1 mm en los

agresivos. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que no existen diferencias significativas en el comportamiento de las fisuras siempre que éstas tengan anchos inferiores alrededor de 0,4 mm, ya que en general estas fisuras se obturan con los propios productos de corrosión y no suponen un riesgo significativo en términos de la vida útil de la estructura. En cambio, factores como relación recubrimiento/diámetro de la armadura y calidad del recubrimiento, han resultado más decisivos en algunos trabajos.

Así, pues, mientras las fisuras no superan anchos de alrededor de 0,4 mm, aunque suponen un camino más corto para que los agresivos alcancen la armadura, en términos de vida útil no parece que supongan un factor que la acorte significativamente.

I.4.3. CORROSION GENERALIZADA

Se produce por un descenso en la alcalinidad del hormigón que puede ser debido a un «deslavado» por circulación de aguas puras o ligeramente ácidas

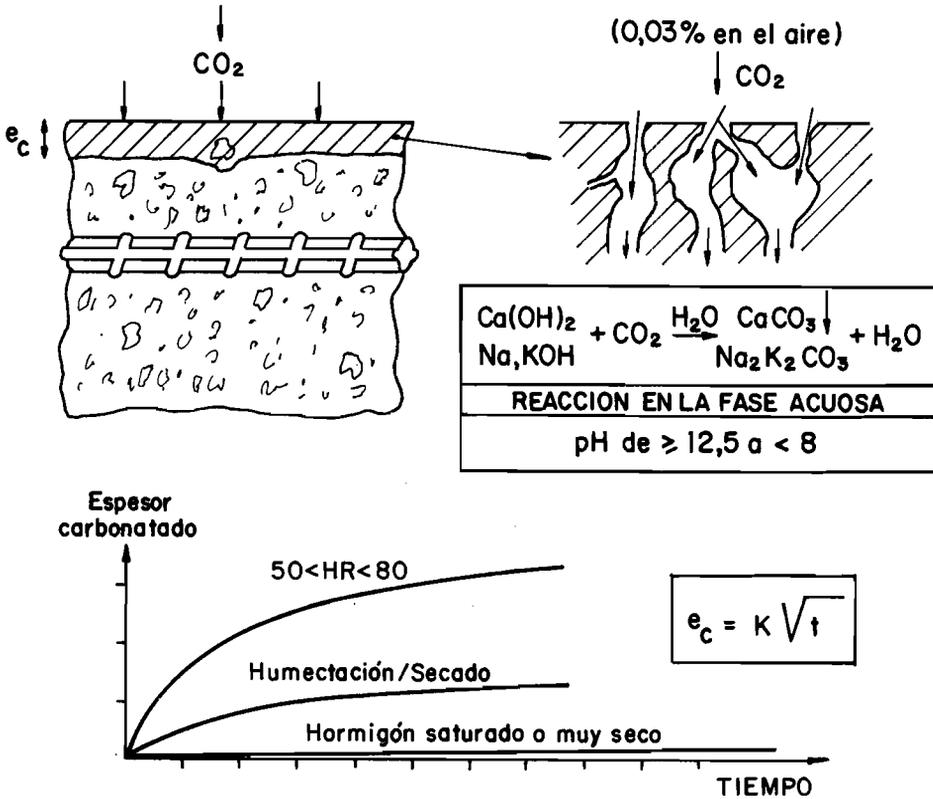


Figura I.12.—Carbonatación del recubrimiento de hormigón y relación del espesor carbonatado con el tiempo y con la humedad ambiental.



Figura I.13.—Variación de color de la fenolftaleína con el pH del hormigón.

o por reacción de los compuestos de carácter básico NaOH , KOH y Ca(OH)_2 de la fase acuosa del hormigón con los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2) para dar carbonatos-sulfatos y agua. El que más abunda es el CO_2 , por lo que a este proceso de reducción de la alcalinidad se le llama genéricamente «carbonatación» (figura número I.12). Una característica de este proceso es la existencia de un «frente» de avance del proceso que separa las dos zonas con pH muy diferente, una con $\text{pH} > 13$ y la otra con $\text{pH} < 8$. Este «frente» se puede visualizar mediante un indicador apropiado como es la fenolftaleína que se torna incolora en la zona carbonatada y toma un color rojo-púrpura en la que permanece alcalina como se muestra en la figura número I.13.

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

$$x = K \sqrt{t}$$

x = profundidad carbonatada
 t = tiempo
 K = una constante

La constante de esta ley depende también de muchos factores relacionados

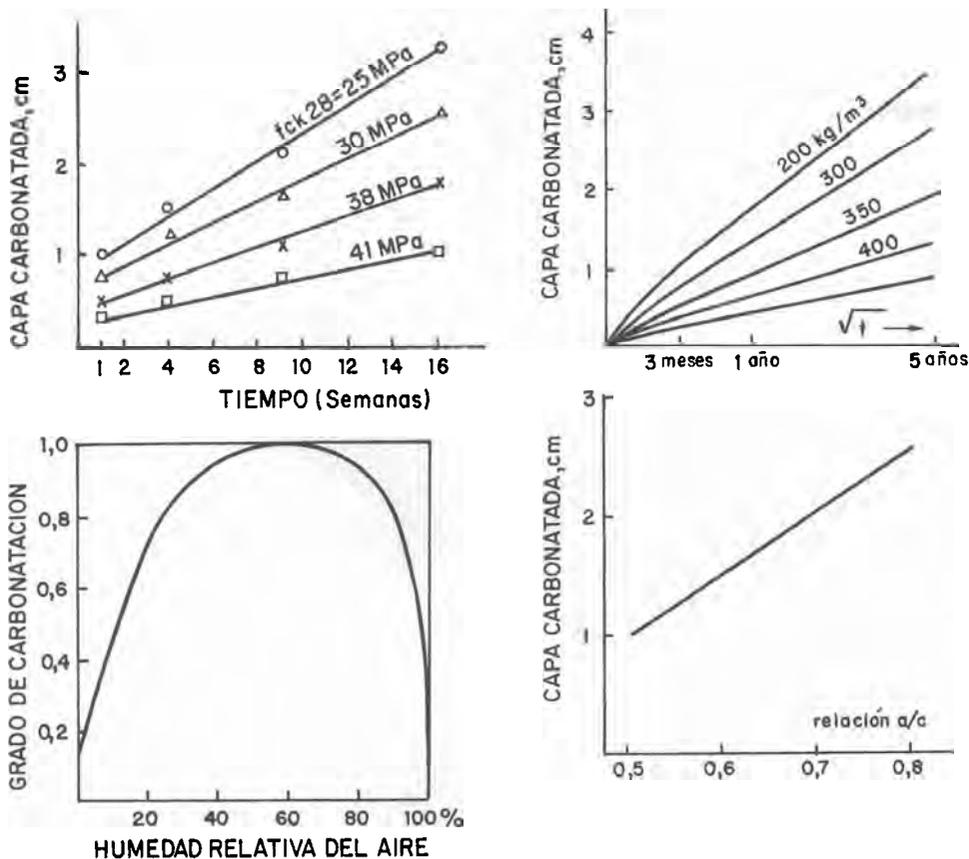


Figura I.14.—Ejemplos de variación del espesor carbonatado con la resistencia del hormigón, el contenido en cemento, la relación a/c y la humedad ambiental.

- con la calidad y resistencia mecánica del hormigón (tipo de cemento, proporción por m^3 de hormigón, relación a/c, etc.) y de la humedad ambiental. En la figura número I.14 se muestra el progreso de la carbonatación en función de alguna de estas variables, en ella puede apreciarse que la humedad óptima de avance del frente se sitúa alrededor del 50 - 80% de humedad relativa. A humedades mayores los poros están saturados de agua y el gas CO_2 penetra con más dificultad hasta la armadura, y a humedades inferiores, los poros están casi secos y el CO_2 no puede reaccionar sin la existencia de un medio líquido.

El tiempo que tarda en llegar el frente carbonatado hasta la armadura es a su vez el «período de iniciación» de este tipo de proceso, ya que una vez que alcanza el acero, la capa pasiva de éste no es estable en los valores próximos a 7, típicos de un hormigón carbonatado. Desaparecida 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.

Cuando la carbonatación se produce en un hormigón que contiene cloruros, se suman los efectos de ambos agresivos provocando 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 libre a los cloruros que mantenían combinados.



Figura I.15.a.—Rotura dúctil de un acero de pretensado.

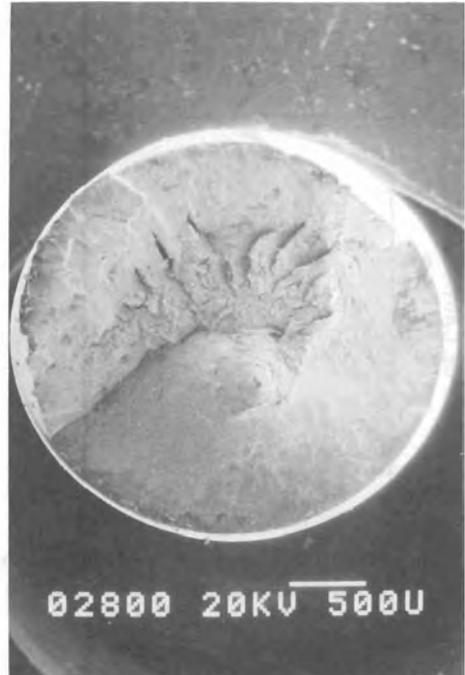


Figura I.15.b.—Rotura frágil al ensayarlo en disolución de bicarbonatos.

I.4.4. CORROSION BAJO TENSION

Aunque no se va a abordar aquí toda la problemática que desencadena este fenómeno, se darán algunas indicaciones breves con el fin de ayudar a distinguirla de los demás tipos de corrosión.

La corrosión bajo tensión como su nombre indica se caracteriza por ocurrir en aceros sometidos a elevadas tensiones en cuya superficie se genera una microgrieta que va progresando muy rápidamente provocando la rotura brusca y frágil del metal, aunque la superficie puede no mostrar prácticamente signos de ataque. La única forma de confirmar la actuación de un fenómeno

de este tipo es mediante un estudio cuidadoso de las superficies de fractura para comprobar la falta de estricción e incluso con el microscopio caracterizar la «facies» de la fractura.

En la figura número I.15 se muestra a la izquierda un acero de pretensado que ha roto mediante rotura dúctil y a la derecha el mismo acero presentando una rotura frágil debido a que se ensayó en presencia de bicarbonatos.

No todos los hormigones pre y postensados que se deterioran, lo hacen mediante este mecanismo, sino que muchos de ellos se corroen simplemente por la penetración de cloruros o carbonatación hasta la altura de las armaduras. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico y por fortuna poco frecuente, que en general va asociado a una falta de calidad del hormigón (mal rellenado de vainas, deslavado del hormigón) o a la presencia de determinados iones como los sulfuros, que provocan fácilmente este tipo de ataque.

I.5. FACTORES ACELERANTES

Una vez iniciada la corrosión y despasivado el acero la velocidad del deterioro sólo es significativa, en términos de vida útil, para una oferta suficiente de oxígeno y por encima de un mínimo de humedad. Los factores que fijan la cinética del proceso de corrosión de las armaduras son:

- el contenido en humedad (oferta de electrolito), que a su vez fija la disponibilidad de oxígeno en las cercanías de la armadura y la resistividad del hormigón,
- la proporción de cloruros,
- la temperatura,
- la existencia de macropares galvánicos.

I.5.1. CONTENIDO EN HUMEDAD

El hormigón es un material que absorbe con facilidad la humedad ambiente, pero en cambio se seca muy despacio. Cuando la humedad exterior es constante, se llega a establecer un equilibrio entre el contenido en humedad en el interior y la humedad relativa, HR, ambiental, pero cuando la humedad exterior oscila, el interior del hormigón no puede seguir los cambios a la misma velocidad, dando como resultado que sólo la capa exterior de la estructura es la que mantiene un equilibrio con la HR exterior (véase figura número I.16), lo que ha llevado a decir que «sólo respira la piel del hormigón». Esta circunstancia tiene diversas consecuencias que será necesario tener en cuenta a la hora de valorar el estado en que se encuentran unas armaduras situadas a una determinada profundidad.

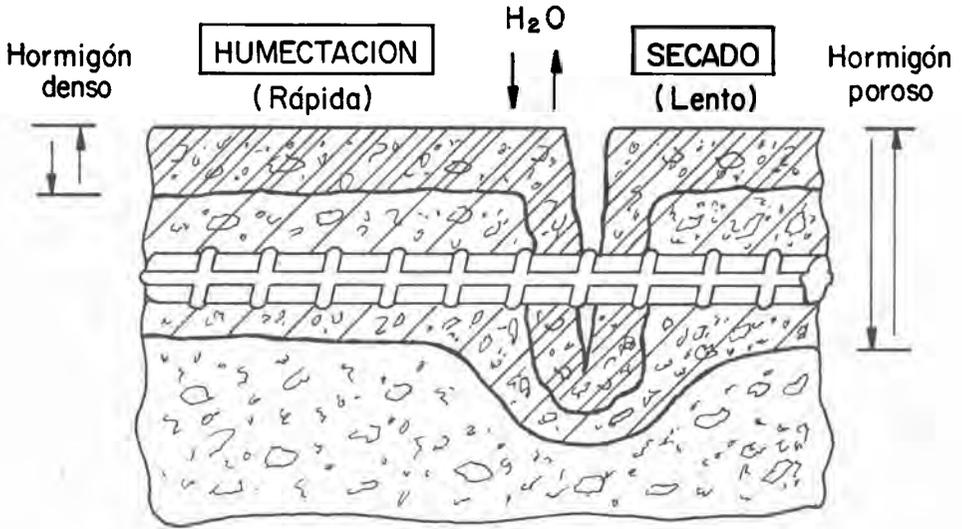


Figura I.16.—Simplificación del fenómeno de intercambio de humedad entre el recubrimiento de hormigón y el medio-ambiente.

El contenido en humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión. Si los poros están saturados de humedad, como es el caso c) de la figura número I.17, entonces aunque la resistividad será la menor posible y por tanto la pila de corrosión estará muy facilitada, el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la armadura. En estas condiciones se dice que el proceso «está controlado por el acceso de oxígeno», y las velocidades de corrosión no serán las más elevadas sino moderadas e incluso muy bajas, como es el caso de las estructuras situadas en los mares a cierta profundidad.

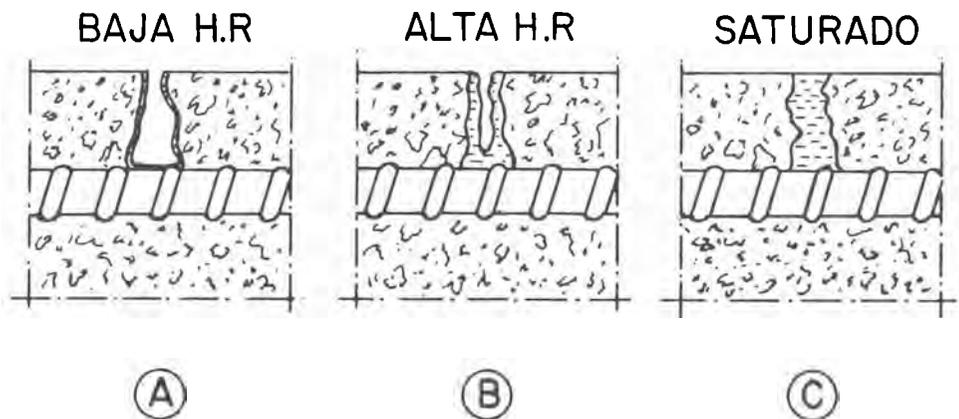


Figura I.17.—Contenido de humedad de los poros de hormigón en función de la humedad ambiental.

Cuando los poros contienen muy poca humedad, entonces la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se encuentra muy dificultado. En este caso la velocidad de corrosión también será baja, aunque el hormigón se encuentre carbonatado y contaminado de cloruros (figura número 17A).

Las velocidades de corrosión máximas se dan en hormigones con contenidos en humedad altos, pero sin saturar los poros. En este caso el oxígeno llega libremente hasta la armadura y la resistividad es lo suficientemente baja para permitir elevadas velocidades de corrosión (figura número 17B).

En la figura número I.18 se resumen los conceptos expuestos. En ella se muestra la relación que existe entre la intensidad de corrosión, I_{corr} , y la resistividad del hormigón (que a su vez es función directa del contenido en humedad). Valores de I_{corr} por debajo de $0,1-0,2 \mu A/cm^2$ indican una corrosión insignificante, en términos de vida útil de la estructura, estos valores aparecen en hormigones muy secos, con resistividades muy altas. Valores hasta $10 \mu A/cm^2$ (equivalentes a $0,11 \text{ mm/año}$ de penetración del ataque) se pueden medir en hormigones carbonatados húmedos (aunque no saturados) y en hormigones con contenidos medios de cloruros. Y velocidades de corrosión entre 10 y $100 \mu A/cm^2$ (ésta última es la máxima velocidad de corrosión medida en hormigón sin actuación de corrientes galvánicas) se aprecian en hormigones muy altamente contaminados de cloruros.

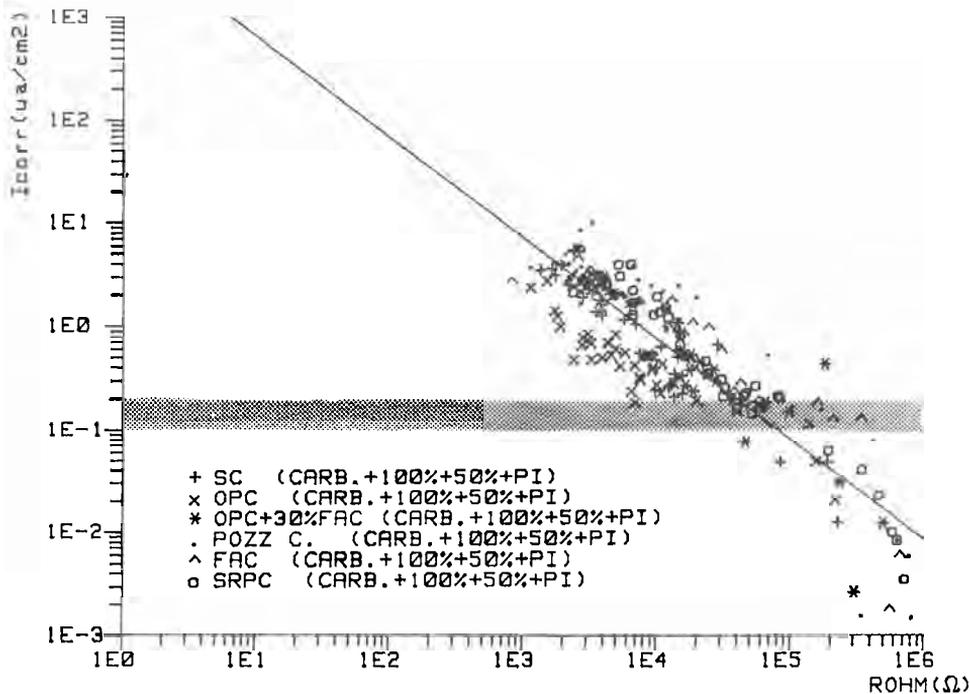


Figura I.18.—Relación entre la Intensidad de corrosión de las armaduras y la Resistencia óhmica compensada entre el electrodo de referencia y el de trabajo.

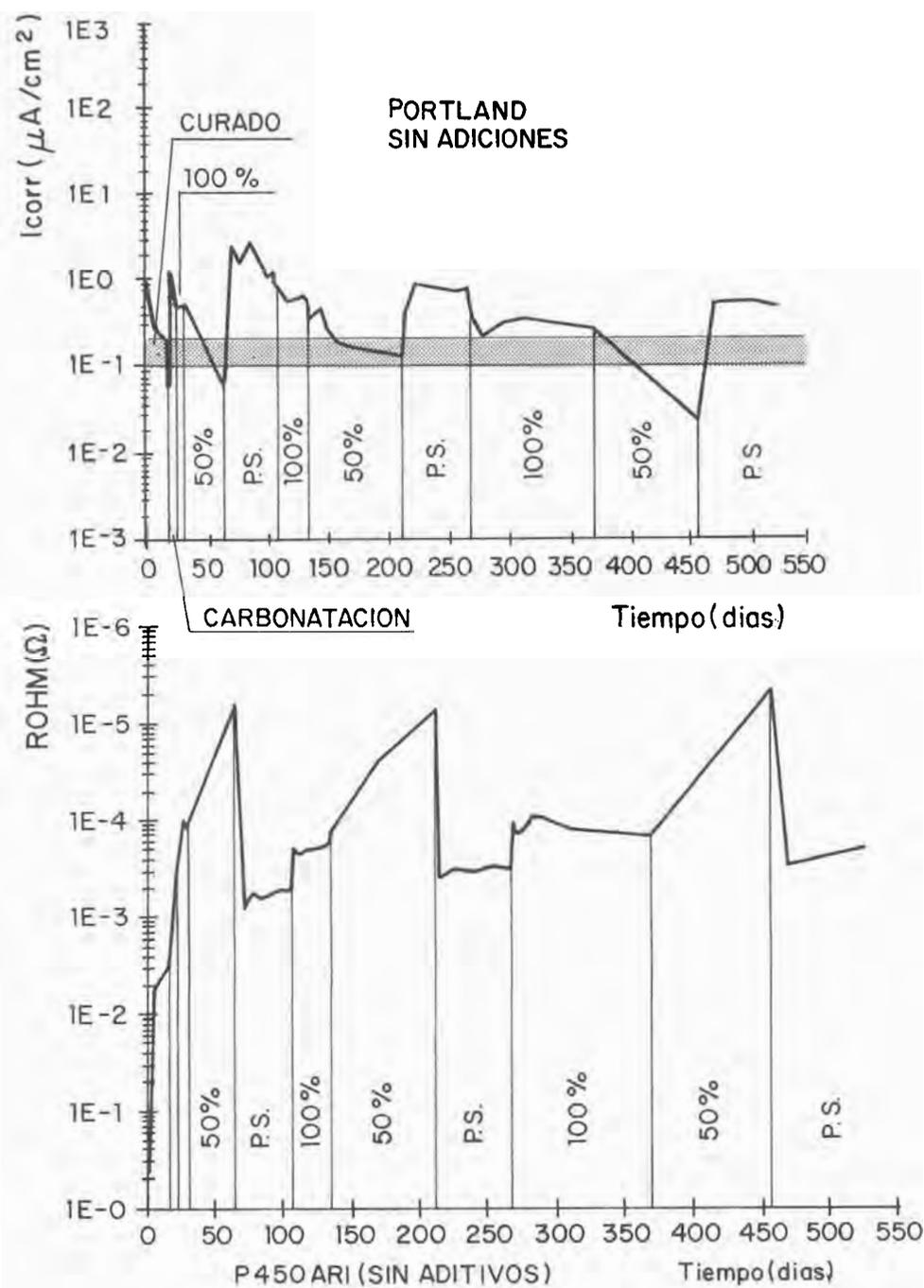


Figura I.19.—Variación de la Intensidad de corrosión (parte superior) y de la resistencia óhmica (parte inferior) de armaduras embebidas en morteros carbonatado conservado en atmósferas con diferentes humedades relativas.

En la figura número I.19 se muestra en la parte superior las variaciones de I_{corr} con el tiempo en probetas carbonatadas aceleradamente y sometidas a cambios de humedad relativa. En la parte inferior se muestran las variaciones paralelas y simultáneas que experimenta la resistencia óhmica.

I.5.2. PROPORCION DE CLORUROS

Aunque todavía no se ha establecido una relación cualitativa entre proporción de cloruros o relación Cl^-/OH^- y velocidad de corrosión, si se ha constatado un aumento de velocidad de corrosión con el incremento de la proporción de Cl^- como se deduce de la figura número I.20, que muestra la I_{corr} con el tiempo de una probeta sumergida en agua de mar conteniendo armaduras con 1,5 y 7,5 cm. de espesor de recubrimiento. Después de un período donde la corrosión se sitúa por debajo de $0,1 \mu A/cm^2$ indicando que los cloruros no han llegado a la armadura en cantidad suficiente, se produce un incremento brusco (despasivación) y luego uno paulatino y constante. Los valores finales al cabo de 5 años en la barra situada a 1,5 cm. son ya muy elevados. Al estar la probeta sumergida en agua de mar, su resistencia óhmica al cabo de un año permanece prácticamente constante, aunque en cambio la I_{corr} crece constantemente, lo que lleva a deducir qué cantidades crecientes de cloruros hacen aumentar la velocidad de corrosión.

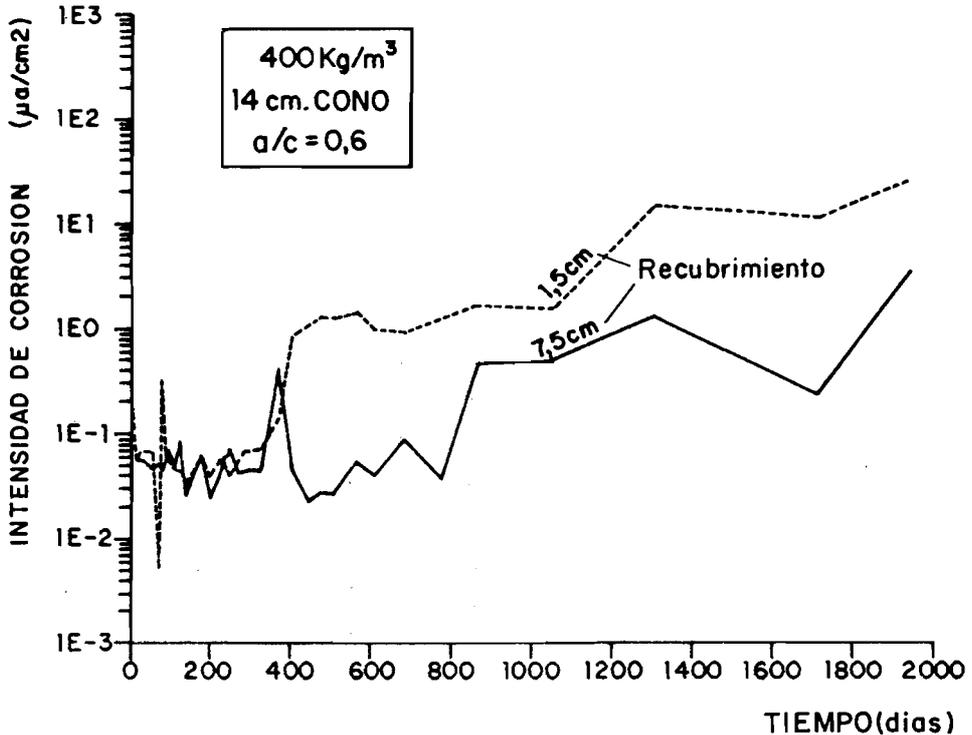


Figura I.20.—Variación de la Intensidad de corrosión de armaduras embebidas en hormigón conservando parcialmente sumergido en agua de mar.

I.5.3. TEMPERATURA

La temperatura juega un papel doble en los procesos de deterioro. Por un lado su incremento, promueve un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones, pero por otro, su disminución puede dar lugar a 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. Así por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso de oxígeno, o bien un incremento de temperatura, acelera la corrosión, pero disminuye la condensación. Este efecto «inversor» puede dar lugar a interpretaciones erróneas.

I.5.4. MACROPARES GALVANICOS

Se entiende como tales a las pilas de corrosión que se pueden generar entre dos áreas distanciadas un máximo de algunos decímetros, una de las cuales está corroída y actúa de ánodo y otra se mantiene pasiva y lo hace de cátodo. Un ejemplo se muestra en la figura número I.21 y es el típico caso de

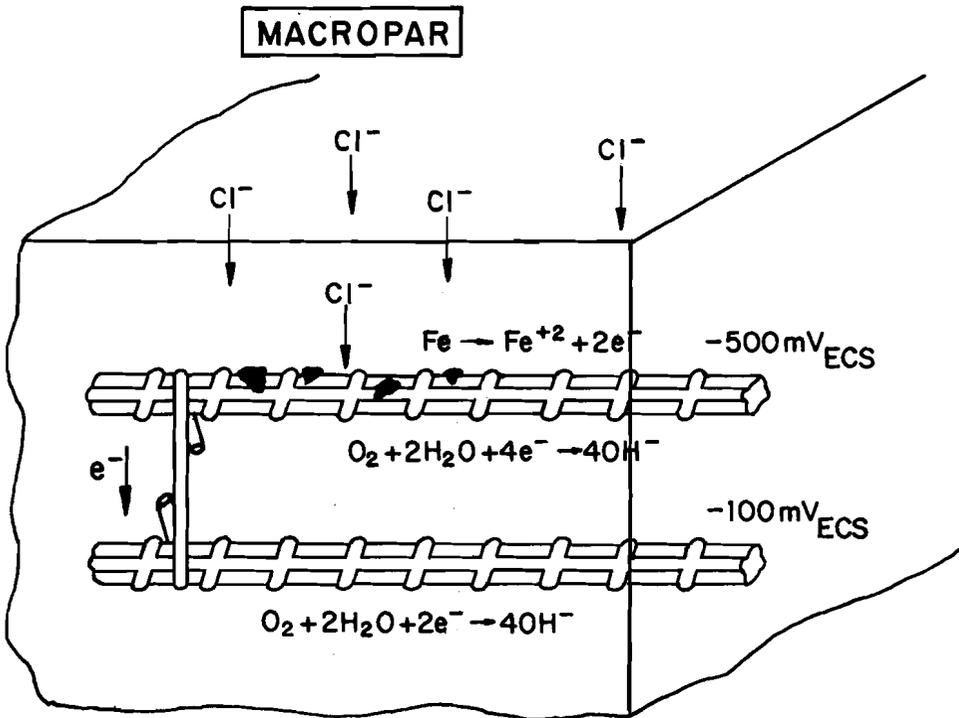


Figura I.21.—Funcionamiento esquemático de un macropar generado por corrosión de las armaduras superiores debido a la penetración de cloruros desde el exterior.

una viga de un tablero de puente, a la que pueden acceder los cloruros de las sales contra heladas por la parte superior, la macropila se formará a través de los estribos, entre la trama superior de armaduras que se empezará a corroer cuando le lleguen los cloruros y la inferior que permanecerá pasiva más largo tiempo.

Cuando una situación como ésta se produce, a la corrosión propia de las micropilas (debidas al ataque por cloruros) se suma la acción de la macropila, incrementando la velocidad de corrosión. El incremento que se produzca depende de los potenciales de corrosión del ánodo y del cátodo en el momento de comenzar la acción de la macropila y de la resistencia óhmica entre ambos. Aunque anteriormente se pensaba que la acción de estas macropilas podía ser muy importante e incluso podían actuar a metros de distancia ahora se ha constatado que esto no es posible, ya que la corrosión se sustenta fundamentalmente por la acción de las micropilas, y ejercen su acción en un radio mucho más limitado, en el que es fundamental identificar la existencia de un electrolito continuo entre el ánodo y el cátodo.

1.6. EFECTOS DE LA CORROSION

Los efectos de la corrosión se manifiestan en tres vertientes: a) sobre el acero con una disminución de su capacidad mecánica, b) sobre el hormigón, cuando éste se fisura y c) sobre la adherencia acero/hormigón.

Los productos derivados de la corrosión de las armaduras son más voluminosos que el acero original, lo que se traduce en la aparición de tensiones radiales que deforman el hormigón circundante sometándolo a tensiones de tracción. Con frecuencia, se acaba produciendo una fisuración del recubrimiento que discurre longitudinalmente paralela a las armaduras corroídas. Si el proceso no es detenido puede saltar todo el recubrimiento, dejando al descubierto la armadura.

Cuando el recubrimiento se fisura longitudinalmente a lo largo de la armadura, pueden quedar seriamente comprometido la comprobación de los estados límite de anclaje y empalme por solapo. También la estructura puede atravesar durante las primeras fases del proceso corrosivo por períodos en que disminuyan los deslizamientos relativos acero/hormigón, con la consiguiente pérdida de ductilidad.

Sin embargo, 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, que incluso a veces no coinciden con la situación de las armaduras (figura número I.22), ya que si hay circulación de agua (de la lluvia, por ejemplo) aparecen en donde emerge la humedad.



Figura I.22.—Manchas de óxido sobre la superficie de hormigón que no corresponden a la existencia de armaduras en su interior en las zonas donde aparece el óxido.

I.7. RECOMENDACIONES DE BUENA PRACTICA PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS

Además de un diseño adecuado que evite innecesarias circulaciones de las aguas a través del hormigón, se puede deducir de todo lo expuesto hasta el momento que para asegurar una durabilidad adecuada resulta decisiva la calidad y el espesor del recubrimiento, ya que es la única barrera contra un medio ambiente siempre agresivo para un metal como el acero que no es estable a la atmósfera.

Así pues, la primera recomendación para hacer durable al hormigón armado en especial si se va a situar en ambientes agresivos es diseñarlo y ponerlo en obra de tal forma que se consiga una homogeneidad que asegure una buena calidad. Asimismo, es necesario extremar las precauciones para asegurar un *espesor de recubrimiento* homogéneo y suficiente. Un alto porcentaje de los deterioros se producen debido a los pequeñísimos espesores de recubrimiento (alguno pocos mm.) que se dejan debido a una deficiente colocación de la ferralla o a que no se han respetado los recubrimientos en el caso de los estribos. En la figura número I.23 se muestran los diferentes espesores de recubrimiento máximos y mínimos que recomiendan distintas normativas y en la tabla número I.4 se dan los espesores de recubrimiento mínimo recomendados por la EH-88.

En cuanto a la influencia del *tipo de cemento* es necesario resaltar que el Portland sin adiciones es el que proporciona mayor cantidad de «reserva alcalina».

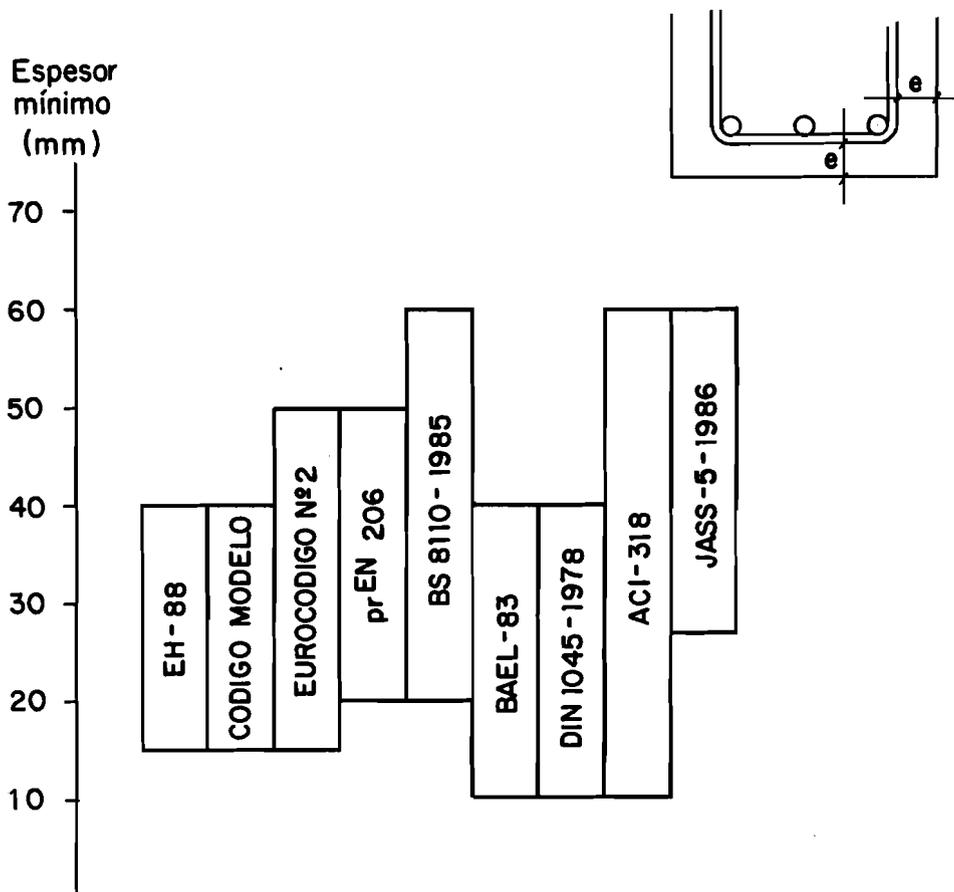


Figura I.23.—Valores de espesor de recubrimiento de armaduras contempladas por las siguientes normativas: 1) EH-88: España, b) Código Modelo: CEB, c) Eurocódigo n.º 2: Comunidad Económica Europea, d) por EN 206 - CEN, e) BS 8810: Inglaterra, f) BAEL: Francia, g) DIN: Alemania Federal, h) ACI: USA e i) JASS - Japón.

CONDICIONES AMBIENTALES DE LA ESTRUCTURA	ELEMENTOS EN GENERAL			Láminas; piezas con paramentos protegidos; piezas prefabricadas		
	$f_{ck} < 250$	$250 \leq f_{ck} < 400$	$f_{ck} \geq 400$	$f_{ck} < 250$	$250 \leq f_{ck} < 400$	$f_{ck} \geq 400$
I - INTERIOR DE EDIFICIOS - Exteriores bajo humedad	20	15	15	15	15	15
II - EXTERIORES NORMALES - Contacto con aguas normales	30	25	20	25	20	20
III - ATMOSFERA MARINA O INDUSTRIAL - Contacto con terreno - Contacto con aguas salinas o ligeramente ácidas	40	35	30	35	30	25

RECUBRIMIENTOS MINIMOS EN mm. SEGUN LA INSTRUCCION EH-88 (fck se expresa en kg/cm²)

TABLA I.4.—

lina» que como su nombre indica supone una reserva o «coeficiente de seguridad» frente al ataque de los cloruros o la carbonatación. Ahora bien, el empleo de adiciones como puzolanas o cenizas volantes si están bien curados, confieren al hormigón un grado mucho mayor de impermeabilidad, lo que hace que el período de iniciación, es decir, el tiempo que tarde el agresivo en llegar a la armadura, puede ser más largo con cementos con adición. Un balance entre, asegurar una cantidad suficiente de clinker de portland y utilizar una adición adecuada en una proporción no muy elevada, puede resultar un compromiso satisfactorio.

La *proporción de cemento* es de vital importancia para asegurar una adecuada compacidad e impermeabilidad del hormigón. Hormigones con altos contenidos en cemento (cuidando que no den lugar a retracción que provocarían una fisuración indeseable) son mucho más durables que hormigones pobres en cemento, aunque ambos alcanzasen las mismas resistencias mecánicas.

Iguals consideraciones pueden efectuarse con respecto a *la relación a/c*, parámetro también que resulta decisivo a la hora de fabricar un hormigón denso y poco permeable. Es deseable siempre acudir a aditivos que permitan trabajar con relaciones a/c lo más bajas posible, siempre y cuando por otro lado, no se aproveche el aditivo para disminuir la cantidad de cemento.

En la tabla número I.5 se dan los valores de la máxima relación a/c y el contenido mínimo en cemento que recomienda la EH-88.

Una vez colocado en obra el hormigón es necesaria una *buena compactación* que asegure un buen recubrimiento de las armaduras y una distribución homogénea de los áridos para finalmente asegurar *un curado* suficientemente largo y continuo, ya que el curado del hormigón es otro de los factores que influye enormemente en la compacidad final del material resultante. Un curado insuficiente bloquea o perturba determinadas reacciones de hidratación y da como resultado un hormigón poroso y mucho más atacable.

En cuanto a las armaduras, *el estado superficial del acero* también influye en la capacidad de pasivación de las armaduras. Si el acero se encuentra recubierto de óxidos de color pardo, su pasivación será más difícil e incompleta y la cantidad de agresivo necesario para despasivarlo será menor que si su superficie se coloca limpia de óxidos y otras suciedades.

I.8. METODOS COMPLEMENTARIOS DE PROTECCION

A pesar de que se tomen todas las precauciones mencionadas y se cumpla con todas las recomendaciones descritas en los códigos, existen ambientes suficientemente agresivos que terminan atacando las armaduras. Tal es el caso de estructuras situadas en las zonas de mareas o las sometidas a la acción de las sales de deshielo (véase tabla número I.2).

RELACION AGUA/CEMENTO (a/c) Y CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO SEGUN EH-88

Ambiente	Relación máxima a/c	Contenido mínimo en cemento Kg/m ³	
		Hormigon en masa	Hormigón armado
I	0,65	150	250
II	0,60	175	275
II (heladas)	0,55	175	300
* II (fundentes)	0,50	200	300
III	0,55	200	300
III (heladas)	0,50	200	300
* III (fundentes)	0,50	200	325
** Químicamente agresivo	0,50	200	325

Ambiente I - Interior de edificios y exteriores con humedad baja (no se sobrepasa el 60% de máxima humedad relativa más de 90 días al año).

Ambiente II - Exterior no agresivo o en contacto con aguas normales o terrenos ordinarios.

Ambiente III - Atmósfera marina o industrial, o en contacto con aguas salinas o ligeramente ácidas

* En estos casos deberán utilizarse aireantes que produzcan un contenido de aire ocluido mayor o igual al 4,5%

** En el caso particular de la existencia de sulfatos el contenido mínimo en cemento de los hormigones en masa se elevará a 250 Kg/m³. Además, tanto para hormigones en masa como para los armados, el cemento deberá ser resistente a los sulfatos si el contenido en sulfatos del agua es mayor o igual que 400 mg/Kg o si en suelos es mayor o igual que 300 mg/Kg.

TABLA I.5.—

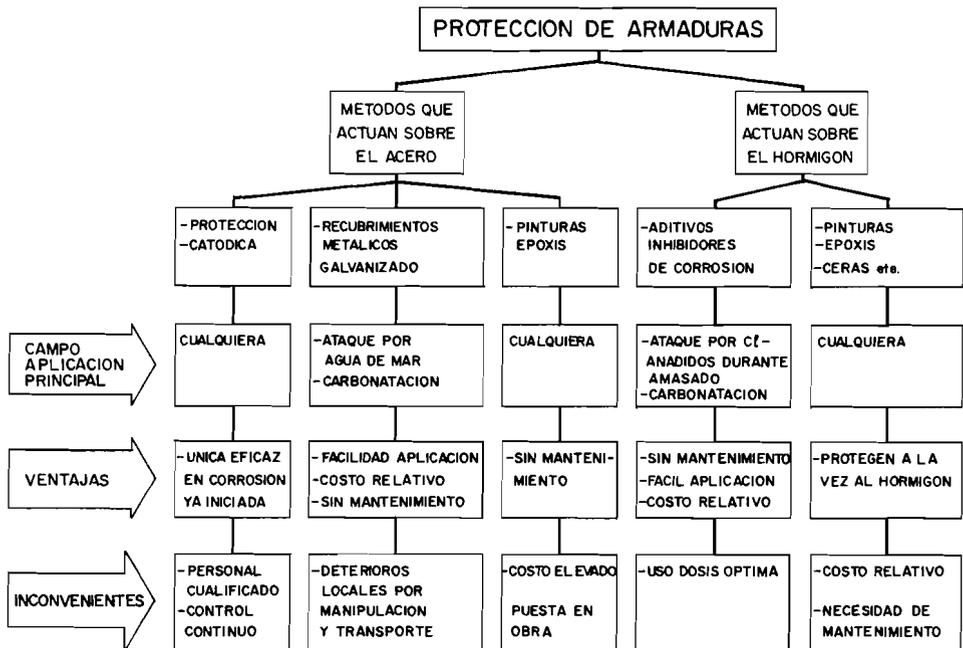


TABLA I.6.—Métodos suplementarios de protección de armaduras.

En estos casos es necesario acudir a métodos complementarios de protección de las armaduras. Los métodos utilizados hasta el momento se resumen en la tabla número I.6, donde se exponen también su campo de aplicación y sus ventajas y desventajas, que se describirán a continuación muy brevemente.

I.8.1. PROTECCION CATODICA

Consiste en situar al acero en la zona de inmunidad de los diagramas de Pourbaix. Ello se consigue aplicándole corriente y haciendo actuar a toda la armadura de cátodo. Se aplica mediante el empleo de los llamados «ánodos de sacrificio» (figura número I.24) o bien mediante el método llamado de «corriente impresa» (figura número I.25).

Es el único método capaz de parar una corrosión ya iniciada. Puede aplicarse sobre cualquier estructura que cumpla determinadas condiciones, como que sus armaduras tengan continuidad eléctrica. Tiene como inconvenientes que necesita un mantenimiento continuo y un personal muy cualificado. Todavía no se conocen sus efectos a largo plazo sobre el hormigón, ya que la experiencia existente es relativamente breve.

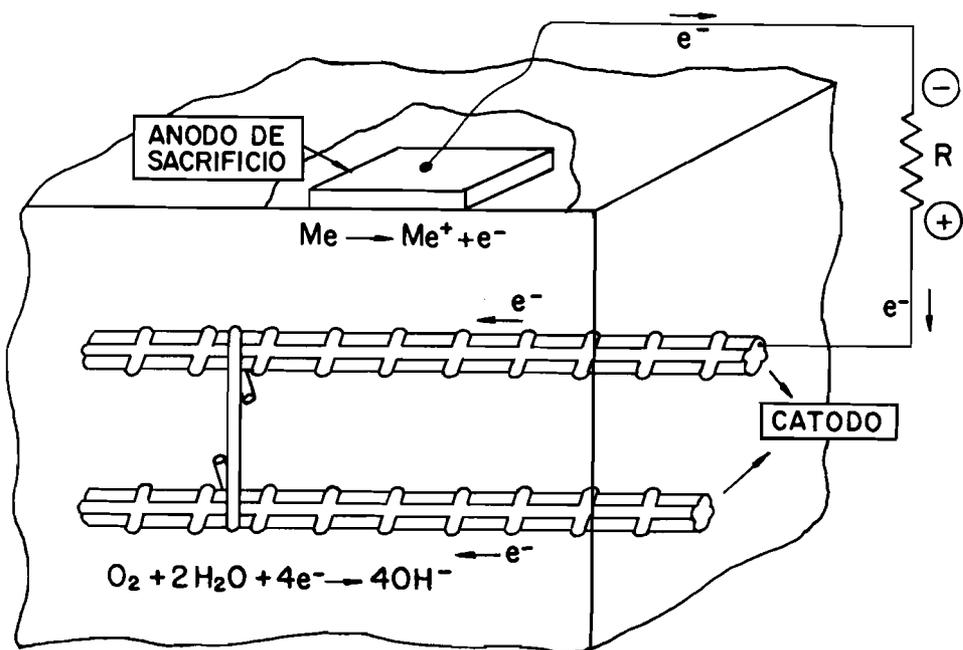


Figura I.24.—Ejemplo de protección catódica mediante «ánodos de sacrificio».

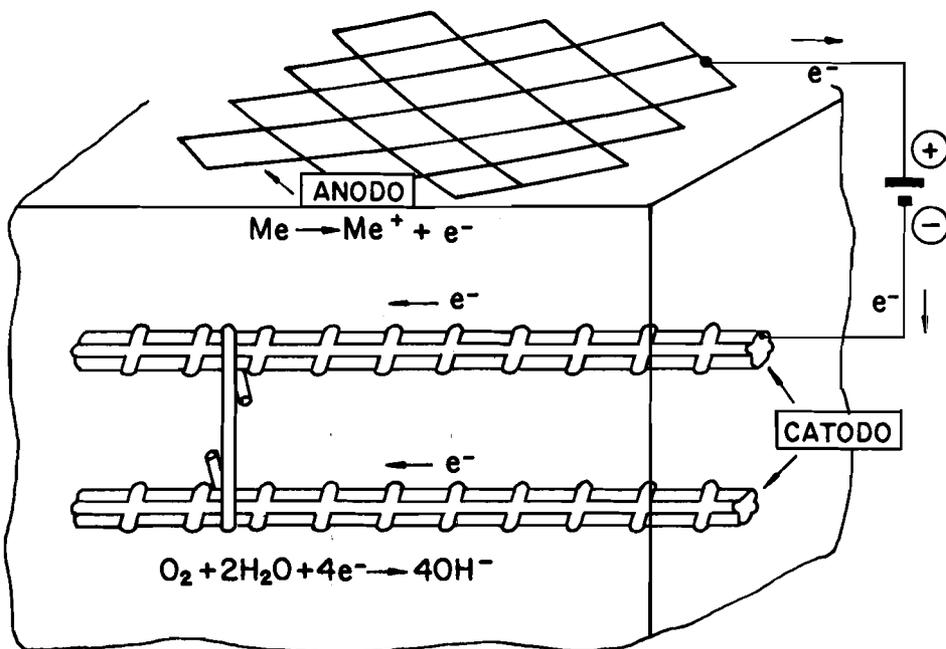


Figura I.25.—Ejemplo de protección catódica mediante «corriente impresa».

I.8.2. GALVANIZACION

La galvanización consiste en sumergir el acero en un baño de zinc fundido a 450° C. El acero base reacciona con el zinc y se recubre de una capa de aleaciones $Fe-Zn$, siendo la capa exterior zinc puro (figura número I.26). El zinc es mucho más estable que el acero frente a la atmósfera y también es más resistente a los cloruros.

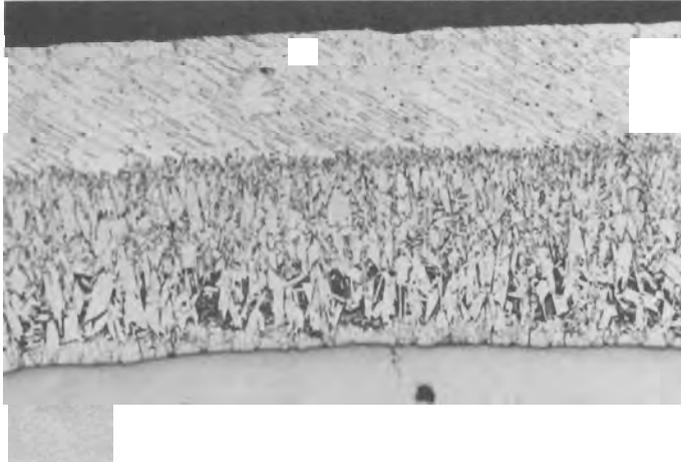


Figura I.26.—Micrografía mostrando una capa galvanizada, la parte más superior es zinc puro (capa η) y en el centro se aprecian las capas halladas (ξ , δ y γ) sobre el acero base.

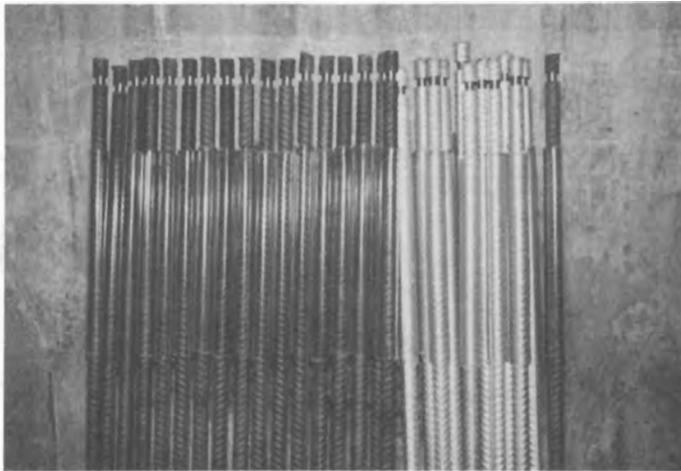


Figura I.27.—Armaduras sin galvanizar (oscuras) y galvanizadas (claras) preparadas para los ensayos de beam-test.

Armaduras galvanizadas (figura número I.27) se usaron mucho en USA hasta que aparecieron casos aislados de fallos en tableros de puentes tratados con sales de deshielo. Desde entonces el uso de armaduras galvanizadas ha sido muy discutido hasta que se han podido clarificar los motivos de la controversia. En la actualidad ya se conocen la mayoría de las circunstancias que delimitan la estabilidad del galvanizado en contacto con hormigón. Así, el pH de la fase acuosa encerrada en los poros del hormigón y el grosor de la capa galvanizada, son los dos parámetros que es necesario fijar para obtener una adecuada durabilidad. El galvanizado resulta más estable en cementos bajos en álcalis y en presencia de cloruros es necesario asegurar un grosor mínimo de capa de zinc puro entre 8 y 10 μm .

De cualquier forma, en hormigones con muy elevados contenidos de cloruros, el galvanizado puede también atacarse, si bien presenta la ventaja de actuar un cierto tiempo de ánodo de sacrificio dilatando la corrosión del acero base. Por el contrario, la galvanización ha resultado un medio muy adecuado de protección cuando la corrosión es debida a la carbonatación del hormigón. En especial sería muy recomendable su uso en todas las piezas prefabricadas de pequeño espesor donde es habitual comprobar deterioros en períodos muy tempranos de 10 ó 20 años (figuras números I.28 e I.29).



Figura I.28.—Balastrada prefabricada que se ha agrietado por corrosión de la armadura central.



Figura 1.29.—Elementos prefabricados de cerramiento superior corroídos debido al poco espesor de recubrimiento.

En nuestro país la galvanización no representa un costo adicional significativo y tiene la ventaja de resultar protector durante el transporte y almacenamiento. Los defectos que se provoquen en la capa de galvanizado durante el trabajado de la ferralla si son muy pequeños (alrededor del mm.) no tienen importancia, pero si son mayores deben repararse con pintura rica en zinc.

I.8.3. ARMADURAS RECUBIERTAS DE RESINA EPOXI

El método más común en la actualidad de recubrir con una fina capa de resina epoxi las armaduras se basa en la deposición electrostática de resina en polvo sobre las barras calentadas a una determinada temperatura.

En principio, este método parece una solución durable debido a la impermeabilidad de las epoxis a los cloruros. Sin embargo, diversos aspectos no han sido solucionados aún, como son: la durabilidad de la propia epoxi en contacto con el hormigón y la ausencia de poros en la capa. La adherencia armadura/hormigón o la posibilidad de dañar la capa de epoxi en el trabajado de la ferralla están siendo objeto de mejora. Tienen el inconveniente de su elevado costo, al menos en nuestro país, donde es necesaria la importación por el momento, y las interrogantes sobre su comportamiento al fuego.

I.8.4. ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSION

Los inhibidores son unas sustancias que tienen la facultad de bloquear la actividad de la reacción anódica (inhibidores anódicos), o de la reacción catódica (inhibidores catódicos) o de ambas a la vez (inhibidores mixtos).

En el caso del hormigón estas sustancias se añaden en el agua de amasado y deben ser activos en un medio alcalino como el del hormigón y no alterar sustancialmente sus propiedades físico-mecánicas.

Numerosas sustancias orgánicas e inorgánicas se han ensayado como inhibidores en el hormigón.

Los ejemplos más conocidos son: dicromato potásico, cloruro estannoso, cromatos de zinc o plomo, hipofosfito cálcico, benzoato sódico, estilanilina y nitrito sódico y cálcico. De entre ellos el que goza de mayor aceptación por su eficacia y compatibilidad con el hormigón es el nitrito cálcico.

La proporción óptima de inhibidor resulta de capital importancia para asegurar la eficacia de producto. En el caso del $Ca(NO_2)_2$ una proporción media del 3% en relación al peso de cemento, inhibe adecuadamente el efecto de la carbonatación. En el caso de los cloruros resultan recomendable siempre relaciones de $NO_2^-/Cl^- > 1$ y, si es posible, al menos de 2.

Estos productos tienen la ventaja de utilizarse como cualquier aditivo y no necesitar mantenimiento, si bien en el caso de corrosión por penetración de cloruros desde el exterior, llega un momento en que la cantidad de inhibidor no resulta suficiente para contrarrestar la acción de los cloruros y la corrosión puede comenzar.

I.8.5. RECUBRIMIENTOS PARA HORMIGON

Una variedad muy extensa de pinturas y recubrimientos para hormigón se usan, con el fin específico de protegerlo contra la entrada de los cloruros o la carbonatación. De todos ellos los que parecen resultar más impermeables son los de base epoxi, si bien presentan el inconveniente del elevado costo relativo y su propia estabilidad a los agentes atmosféricos.

Los recubrimientos que se desee sean eficaces contra la entrada de cloruros, lo han de ser también al vapor de agua, con los inconvenientes de no transpiración que ello conlleva. En cambio, son muchos los recubrimientos eficaces contra el progreso de la carbonatación, la cual se puede retardar muy significativamente con pinturas de muy bajo costo, como las usadas habitualmente con fines meramente estéticos.

Los recubrimientos es necesario usarlos desde la puesta en obra de la estructura, ya que una vez que el deterioro ha comenzado, el uso de una barrera de este tipo puede agravar los problemas en lugar de mejorarlos, al no permitir el secado del hormigón cuando ello fuera posible.

I.9. BIBLIOGRAFIA

S. FELIU:

Principios de corrosión electroquímica y tipos de ataque - Teoría y Práctica de la lucha contra la Corrosión - Ed. C.S.I.C. - MADRID (1984).

H. H. UHLIG:

Corrosion and corrosion control - 2.ª edición - John Wiley & Sons, New York, 1971.

M. POURBAIX:

Atlas of Electrochemical Equilibrium in aqueous solutions - Pergamon Press Ltd. London 1976.

U. R. EVANS:

The corrosion and oxidation of metals - Arnold and Co. Edic. London 1960.

CEB:

Bulletin n.º 166 - Guide to Durable Concrete Structures - Mayo 1985.

J. A. GONZALEZ y C. ANDRADE:

La corrosión en estructuras de hormigón armado. Forma de prevenirla y evaluarla - Teoría y Práctica de la lucha contra la Corrosión - Ed. C.S.I.C. - Madrid 1984.

CEB:

Bulletin n.º 152 - Durability of Concrete Structures (1983) - Workshop Copenhagen.

FIP Recommendations:

Design and Construction of Concrete Sea Structures - London (1985).

FIP:

Guide to good practice: Inspection and maintenance of reinforced and prestressed concrete structures - London (1986).

J. E. SLATER:

Corrosion of Metals in Association with concrete - ASTM - STP 818 - Dic (1983).

J. M. COSTA:

Fundamentos de electródica. Cinética electroquímica y sus aplicaciones -
Ed. Alhambra Universidad - Madrid 1981.

CEB:

Boletín 166 - Draft CEB - Guide to durable concrete structures (1985).

K. TUUTI:

Corrosion of steel in concrete - Swedish Cement and Concrete Research
Institute - Stockholm.

A. P. CRANE

Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction - Soc. of Chemical
Industry - London 1983 - Ellis Horwood Pub.

CEB:

Boletín 192 - Diagnosis and assessment of concrete structures (1988).

CEB:

Boletín 162 - Assessment of concrete structures and design procedures
for up-grading (re-design) (1983):

P. PEDEFERRI:

Corrosione e protezione di strutture metalliche e in cemento armato negli
ambienti naturali - Ed. CLUP - Milano 1987.

P. SCHIESSL:

Corrosion of steel in concrete - RILEM - Report - Ed. Chapman and
Hall - London 1988.

ACI:

SP - 65 - Performance of concrete in Marine Environment (1980).

RILEM:

Committee 12-CRC - Corrosion of reinforcements and prestressing ten-
dons. A state-of-the-art- report —Materiaux et Constructions— Vol. 9 -
n.º 51.

ACI:

Committee 222 - Corrosion of Metals in concrete - Concrete International
- Sep 1985 - págs. 56-59.

J. E. SLATER:

Corrosion of reinforcing steel in concrete. Magnitude of the problem. *Materials Performance* - Junio (1979), págs. 34-37.

J. A. GONZALEZ, S. ALGABA y C. ANDRADE:

Corrosión de armaduras en hormigón carbonatado - *Materiales de Construcción* 181 (1981), pág. 45-53.

C. ANDRADE, C. ALONSO y J. A. GONZALEZ:

Ensayos de laboratorio sobre el efecto inhibitor de los nitritos sobre la corrosión de las armaduras - *Materiales de Construcción*. Vol. 34 - n.º 195 (1984), págs. 41-50.

J. RODRIGUEZ y C. ANDRADE:

Análisis de las condiciones de fisuración en las estructuras de hormigón armado y su relación con la probabilidad de corrosión de las armaduras - *Informes de la Construcción*. Vol. 36 - n.º 368 (1984), págs. 37-52.

C. ANDRADE:

Comentarios sobre factores desencadenantes y acelerantes de la corrosión de armaduras - *Materiales de Construcción* n.º 172 (1978), págs. 63-69.

C. ANDRADE y J. A. GONZALEZ:

Comportamiento del acero galvanizado en el hormigón armado - *Rev. Iberoamericana de Corrosión y Protección* - n.º 4 (1984), págs. 36-41.

J. A. GONZALEZ y C. ANDRADE:

Problemas de corrosión en la industria de la Construcción - IV Congreso Nacional de Corrosión y Protección - Feb (1986).

ACI:

Committee n.º 362 - State-of-the-art. report on Parking structures (1985).

CAPITULO II

INSPECCION Y DIAGNOSTICO

Tal como se señaló en el Capítulo anterior, la corrosión de armaduras generalmente se presenta con síntomas visibles de manchas de óxido en la superficie del hormigón o delaminaciones o grietas que corren siempre paralelas a las armaduras, pero también la corrosión se puede presentar sin ningún signo visible en la superficie del hormigón. De hecho cuando una estructura está dañada, la corrosión no sólo existe en las zonas que se ven deterioradas, sino que también pueden estar corroídos los redondos situados en partes sin ningún signo exterior visible de daño.

La morfología del deterioro (grietas, paralelas a las armaduras, delaminaciones o simples manchas) depende de una serie de factores como el diámetro y separación de las armaduras, el espesor y calidad del recubrimiento, la geometría de la pieza, la magnitud (cantidad y velocidad de generación de óxido) de la propia corrosión y el contenido en humedad del hormigón (en el hormigón frecuentemente húmedo el óxido emigra a través de la red de poros y puede no producir agrietamiento).

Para dictaminar sobre las causas precisas y los factores concomitantes de una problemática particular, es decir, para conocer la naturaleza y extensión del problema es necesario realizar en primer lugar un examen visual y abordar una serie de ensayos sobre muestras de la estructura.

La sistemática que se recomienda es la de una inspección preliminar y en su caso una posterior inspección detallada. La inspección preliminar consistirá en un examen visual para caracterizar todos los síntomas, así como realizar un número pequeño de ensayos que permitan acotar el problema y en su caso preparar un plan más detallado para desarrollar una inspección pormenorizada. La inspección detallada, que no siempre puede ser necesaria, tiene por objeto cuantificar la extensión del deterioro y caracterizar todos los elementos de la estructura, su desarrollo exige una amplia campaña de ensayos.

Si el técnico tiene una larga experiencia previa en la corrosión de armaduras, la inspección preliminar puede ser suficiente para abordar una reparación o solución del problema. En los demás casos será necesaria una inspección pormenorizada para caracterizar la extensión del daño. En ocasiones se aborda esta inspección detallada cuando se efectúa la propia reparación.

II.1. INSPECCION PRELIMINAR

Esta inspección debe permitir dictaminar la naturaleza y causa del problema, y debe incluir:

- a) Examen visual de toda la estructura, usando binoculares si el acceso no permite una observación directa, realizando un reportaje fotográfico lo más extenso posible. Este examen se realizará elemento por elemento diferenciado de toda la estructura con el fin de comprobar si los síntomas y la naturaleza del problema es igual en todos los elementos o existe más de una problemática en el conjunto.
- b) Anotación de todos los síntomas visuales (manchas de óxido, color de los mismos, situación y tamaño de las fisuras, etc.).
- c) Identificación de la agresividad del ambiente (suave, moderado o agresivo).
- d) Eliminación del recubrimiento de hormigón en algunos puntos singulares para la observación visual directa de las armaduras, fotografiando las zonas de extracción de testigos y tomando nota de:
 - espesor de recubrimiento,
 - disminución del diámetro de la armadura,
 - cuantía y color de los óxidos,
 - aspecto del hormigón.

Los ensayos mínimos necesarios para completar esta inspección preliminar son:

- 1) Profundidad de carbonatación.
- 2) Presencia de cloruros, delimitando si los contenía el hormigón o han penetrado desde el exterior.
- 3) Calidad del hormigón (al menos porosidad y resistencia).

La metodología de extracción de los testigos y de realización de estos ensayos se enumera en el próximo capítulo.

Dado lo limitado del examen, en una inspección preliminar resulta crucial la elección de la proporción y los elementos de la estructura sobre los cuales se procederá a realizar los ensayos. Esta es una decisión arriesgada que depende primero de cuál sea la causa del deterioro y del tipo de estructura y después de la experiencia previa que tenga el técnico en problemas similares. En la decisión sobre las zonas de extracción de testigos los detalles a tener en cuenta en relación al ambiente externo son:

- identificación de las zonas expuestas a la atmósfera más agresiva,
- zonas aparentemente más dañadas con presencia visible de signos de corrosión,

- zonas de máximo trabajo mecánico,
- zonas de vientos predominantes y asoleamiento.

Los testigos deben extraerse tanto de estas zonas como de las que se encuentren en situación contraria.

Finalmente, se deben también tener en cuenta en toda inspección los aspectos resistentes de la estructura y las consecuencias o la influencia que ejercen las cargas y el peso propio de la misma en los daños generados. En algunas ocasiones son las sollicitaciones mecánicas las responsables de un progreso rápido del fenómeno o de su desarrollo en un determinado elemento de la estructura. Y en todo caso las consideraciones sobre la seguridad residual de la estructura se deben siempre tener en cuenta a la hora de realizar la extracción de testigos o cualquier tipo de intervención y serán complemento imprescindible de cualquier diagnóstico. Aunque el dictamen sobre la situación de resistencia mecánica de la estructura no es objeto del presente Manual, algunas consideraciones sobre seguridad residual se darán en el Capítulo V.

II.2. INSPECCION DETALLADA

Como ya se mencionó con anterioridad la Inspección pormenorizada tiene por objeto delimitar la extensión del deterioro en todas las partes o elementos de la estructura. Puede ser realizada como paso previo a una intervención o simultáneamente con ella, en todo caso hay que tener en cuenta, como ya se destacó, que una inspección detallada en ocasiones no es necesaria.

Al acometer la inspección detallada de una estructura dañada por corrosión de armaduras es imprescindible la elaboración de un plan de trabajo a partir de la información procedente de la Inspección Previa y la documentación existente sobre la construcción de la estructura (proyecto, plan de control, resultados de ensayos, etc.) tal y como se indica en la tabla número II.1. También hay que prever los medios de acceso a todos los elementos a inspeccionar, así como la disponibilidad de energía, agua y otros medios auxiliares necesarios para la realización de los trabajos:

En el Plan de Trabajo es necesario considerar las siguientes actuaciones:

- Realización de un Plan de Muestreo con indicación de los elementos de la estructura e inspeccionar su ubicación y el número de ensayos a efectuar en ellos.
- Enumeración de los tipos de ensayos a realizar en cada elemento y elaboración de las fichas individuales correspondientes.
- Confeción de croquis y planos de cada elemento inspeccionado con el detalle de los ensayos efectuados y los resultados obtenidos, cuando los hubiere.
- Detalle de los medios auxiliares necesarios: herramientas, reactivos, aparatos, etc., y la verificación de su puesta a punto o tarado previo.

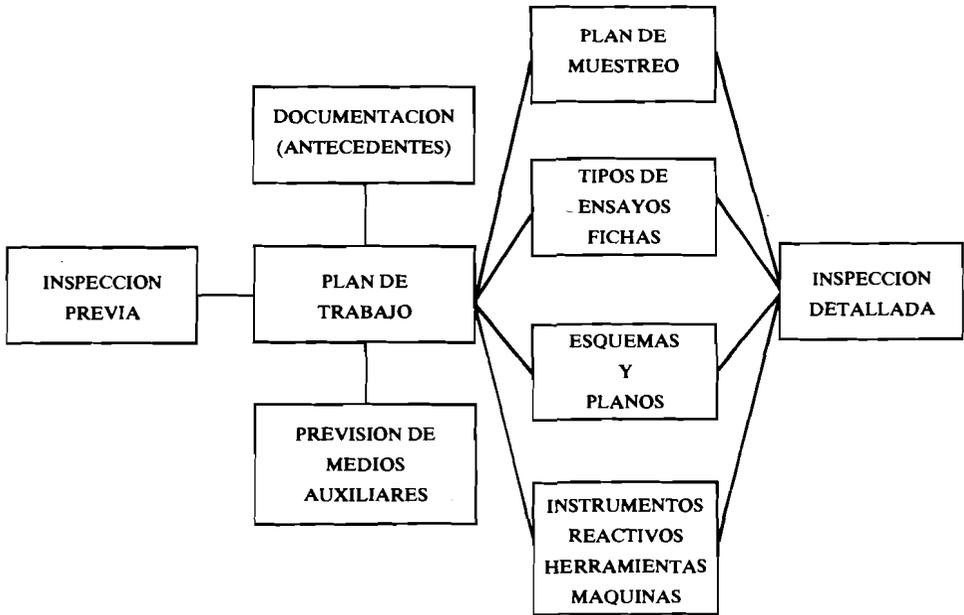


TABLA II.1.—

II.2.1. PLAN DE MUESTREO

Tiene como finalidad dividir la estructura en elementos o fracciones que sean representativas de conjunto, ya que aunque la estructura sea pequeña, en general, no será posible la exploración de todos y cada uno de sus componentes.

Para efectuar esta división es necesario establecer la terminología que se vaya a utilizar. Un ejemplo de la que se puede adoptar sería:

- Elemento: parte de la estructura que realiza una función resistente específica.
- Lote: conjunto de elementos fabricados en las mismas condiciones.
- Fracción: subconjunto de elementos de un lote sometidos a un mismo ambiente.
- Muestra: elementos que se eligen como representativos de un lote o de una fracción de obra.
- Tamaño de la muestra: número de elementos que componen la muestra.

Los cuatro criterios fundamentales sobre los que se debe basar el Plan de Muestreo, en el caso de estructuras dañadas por corrosión de armaduras son: a) las características del hormigón en su estado inicial de colocación en obra; b) los tipos de medios ambientales (agresivos en su caso); c) el grado de

deterioro (tanto del hormigón como de las armaduras), y d) la capacidad de respuesta inicial de la estructura. Otros criterios que se consideren oportunos serán tenidos en cuenta en cada caso.

Así habrá que dividir la estructura en porciones representativas en las que, por un lado se presume la calidad homogénea de hormigón (lotes), por otro en aquellas que están sometidas a un mismo medio ambiental o agresivo (fracción de obra) y finalmente se identificarán en croquis o planos aquellas zonas en apariencia deterioradas con igual intensidad.

Para la *identificación de los lotes* se puede acudir a distintas características del hormigón que permitan acotar porciones de similar calidad. Al abordar esta cuestión se puede contar o no con documentación procedente del momento de la construcción. Así se puede acudir a criterios de simultaneidad en el hormigonado, o su fabricación a igualdad de clima exterior, o finalmente acudir a la determinación de la resistencia mecánica, bien sea mediante ensayos destructivos (extracción de testigos) o no destructivos (ultrasonidos), o una combinación de ambos que suele resultar más adecuada.

Para la *identificación de las fracciones* se analizaron los posibles medios ambientales diferentes que puedan afectar a la estructura atendiendo tanto a los macro como microclimas (zonas aéreas, insolación, vientos preferentes, humedades, ventilaciones dirigidas, etc.).

Finalmente, y apoyados en los resultados de la Inspección visual, se dividirá la estructura por los grados de deterioro que aparente.

II.2.2. INSPECCION VISUAL

En una Inspección detallada el análisis visual debe ser amplio (figura II.1) y sistemático para que tenga algún valor a la hora de la elaboración del diagnóstico final. Basándose en la identificación de lotes y fracciones de la estructura, se utilizarán impresos adecuados en los que se puedan ir acumulando todas las observaciones, levantando croquis o apuntando los resultados de los ensayos (véase figura número II.2).

Se debe inspeccionar tanto el aspecto de los exteriores (hormigón y acabados) como el estado de las armaduras. La inspección exterior se realizará sobre todos y cada uno de los elementos y se anotarán todas las anomalías que se detecten: humedades, eflorescencias, grietas, manchas de óxido, desprendimientos de hormigón, levantamiento de acabados, expansiones, etc.

La Inspección de las armaduras mediante catas se ejecutará sobre los elementos y fracciones seleccionados con criterios similares a los del muestreo para el resto de los ensayos. Es importante en este capítulo: a) la medida de la disminución del diámetro de las armaduras (que permitirá una estimación aproximada de la velocidad de corrosión si se conoce el número de años transcurridos desde el comienzo del deterioro), b) el color y aspecto de los óxidos y c) la morfología del ataque a las armaduras (si es localizado o generalizado, presentado cráteres o no).

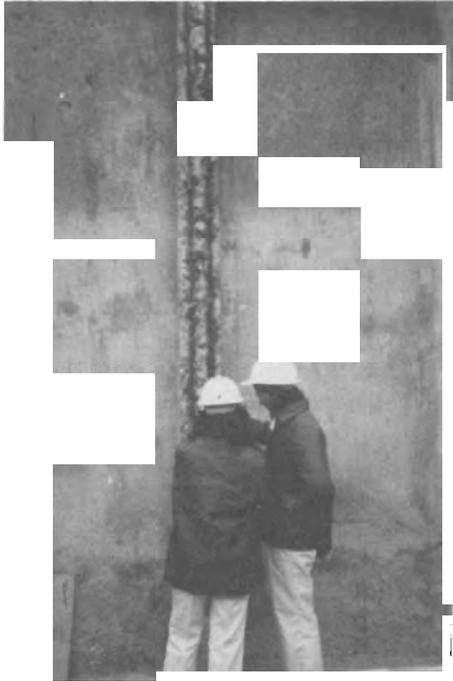


Figura II.1.—Inspección visual de pilar de hormigón con armaduras muy corroídas.

	ESTADILLO DE MUESTREO			CROQUIS
	OBRA: _____		EXP.: _____	
	LOTE: _____		CONTENIDO: _____	
	FECHA: _____			
	FRACCION A	FRACCION B	FRACCION C	
	ELEMENTOS	ELEMENTOS	ELEMENTOS	
ENSAYOS A REALIZAR				
<input type="checkbox"/> POROSIDAD DENSIDAD	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> RESISTENCIA MECANICA	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> CLORUROS DE COMPOSICION	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> PROFUNDIDAD DE CARBONATACION	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> CLORUROS AÑADIDOS	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> SULFATOS	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> ESPESOR DE RECUBRIMIENTO	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> POTENCIAL DE CORROSION	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
<input type="checkbox"/> DISMINUCION DE ARMADURA	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	
	OBSERVACIONES			

EJEMPLO DE IMPRESO PARA EL PLAN DE MUESTREO DE UNA PARTE DE OBRA

Figura II.2.—

Dado que hasta la actualidad no es accesible todavía para el técnico inspector, la medida a pie de obra de la velocidad de corrosión de las armaduras, es necesario acudir a una clasificación del grado de deterioro en función de la apariencia de éste. Como ejemplo se puede adoptar una clasificación como la sugerida en el Boletín 162 del CEB y que se muestra en la tabla II.2.

Indicaciones visuales	NIVELES DE DAÑOS				
	A	B	C	D	E
Cambio de color	Manchas de óxidos	Como en A	Como en A	Como en A	Como en A
Fisuración	Alguna longitudinal	Varias longitudinales Alguna en estribos	Generalizada	Como en C	Como en C
Delaminación del recubrimiento		Algo	Generalizada	En zonas el acero no está en contacto con el hormigón	Como en D
Merma sección acero (*)		~ 5%	~ 10%	~ 25%	Rotos algunos estribos
Flechas				Posibles	Visibles

(*) Merma sección = $\frac{\Delta A_s}{A_s} = \frac{t_o}{a \phi}$ siendo t_o el espesor de los óxidos, ϕ el diámetro nominal de las barras y $a=1$ para óxidos puros y $a=2$ para óxidos con material cementante.

TABLA II.2.—Niveles de daños según los clasifica el Boletín 162 del CEB.

Al margen de otras anotaciones o croquis que se vea oportuno realizar según el criterio del técnico inspector, es recomendable efectuar planos donde se puedan apreciar las distintas graduaciones del deterioro cuando existan (mediante colores, por ejemplo). El resultado sería un *Mapa del Deterioro* que puede aportar una visión del conjunto (véase figura número II.3). La elaboración de estos mapas puede superponerse con los resultados de otros ensayos como el contenido en cloruros, porosidad del hormigón, potencial de corrosión, etc., con el fin de tratar de correlacionar los distintos parámetros.

Toda inspección visual debe ir complementada, como ya se mencionó en el capítulo anterior, por un reportaje fotográfico lo más objetivo e ilustrativo posible.

II.3. DIAGNOSTICO

El dictamen sobre las causas de los daños que presente la estructura debidas a la corrosión de sus armaduras se debe realizar en función de los principios expuestos en el capítulo primero, de las apreciaciones deducidas de la

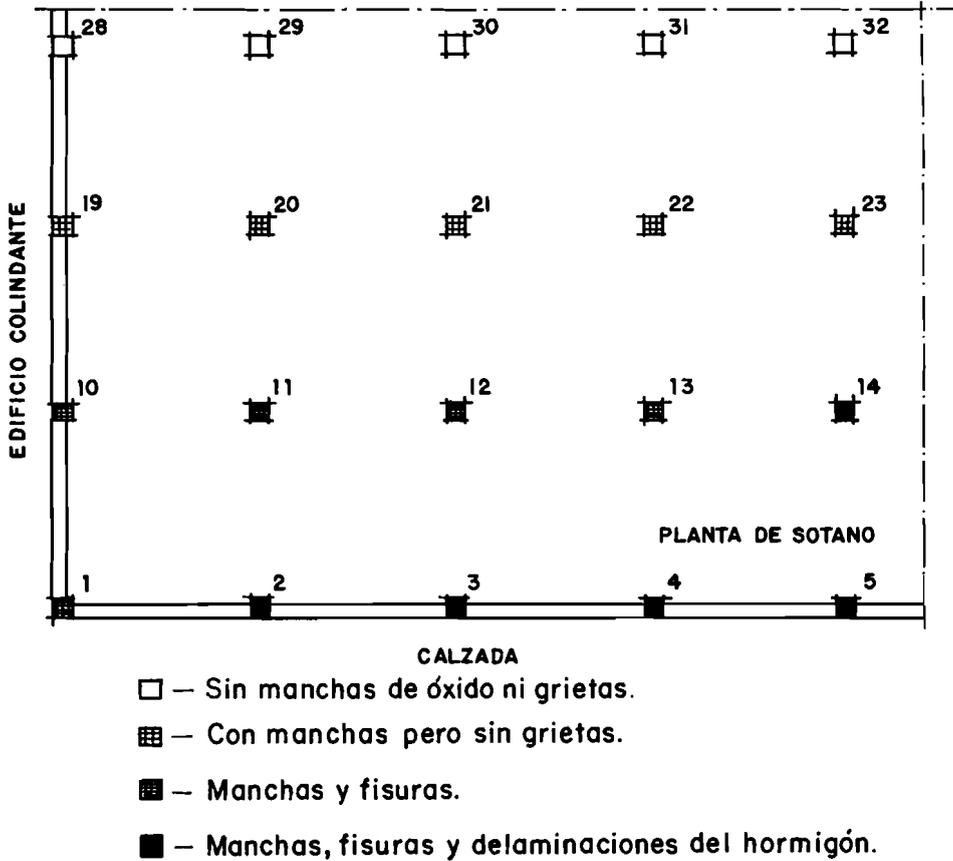


Figura II.2

inspección y de los resultados obtenidos de los ensayos efectuados (que se describirán en el capítulo siguiente).

Como ya se ha mencionado, son principalmente dos las causas posibles de que una armadura comience a corroerse: la presencia de cloruros en la masa del hormigón o la disminución del pH de la fase acuosa contenida en sus poros. Ahora bien, para que la despasivación del acero progrese y se manifieste con signos visibles de deterioro en el exterior es necesario que concurren otras circunstancias, entre la que destaca principalmente el mantenimiento de una determinada humedad en el interior del hormigón.

Además, todo daño por corrosión de armaduras afecta en algún grado al estado resistente de la estructura por lo que resulta necesario siempre realizar una estimación sobre la resistencia residual que en ese momento posee la estructura.

Realizar un diagnóstico correcto de las causas de la iniciación del proceso y de los factores que han influido en su propagación hasta el estado de deterioro consiguiente, resulta fundamental cuando se pretende una reparación duradera.

CAPITULO III

ENSAYOS

Los ensayos cuya metodología se describirá a continuación y que constituyen la información básica necesaria para poder efectuar un dictamen sobre las causas que han podido determinar la corrosión de las armaduras y su propagación son:

1. Resistencia mecánica del hormigón.
2. Espesor de recubrimiento y características de las armaduras.
3. Porosidad/densidad.
4. Contenido en cloruros.
5. Contenido en sulfatos.
6. Profundidad de carbonatación.
7. Contenido en humedad del hormigón.
8. Resistividad eléctrica.
9. Potencial de corrosión electroquímica.

De entre todos ellos la determinación de contenido en cloruros y de la profundidad de carbonatación son los dos únicos ensayos que resultan imprescindibles para dictaminar las causas del deterioro. El conocimiento de la resistencia del hormigón, de su porosidad y del espesor de recubrimiento, aportan informaciones complementarias que ayudan a dictaminar sobre su calidad. En cuanto a la medida del potencial electroquímico de corrosión de las armaduras facilita indicaciones cualitativas sobre si el acero se está corroyendo activamente o se conserva pasivo y el contenido en humedad puede resultar indicativo de velocidad de propagación de proceso en el futuro.

TOMA DE MUESTRAS

Se tomarán todas las precauciones para que la muestra de hormigón sobre las que se realicen las distintas determinaciones represente lo más fielmente posible la composición, sobre todo de sales solubles, que existía en el elemento de la estructura objeto de estudio. Además se tratará de extraer el menor número de testigos posible, ya que, aparte del costo de la operación, no es recomendable utilizar más de un taladro o a lo sumo dos, por cada elemento

(caso de soportes o vigas). Estos testigos se fraccionarán en rebanadas o como se considere más conveniente con el fin de obtener muestras para la realización de todos los ensayos.

Cuando sea necesario la exploración a fondo de un elemento con determinaciones en diversos puntos habrá que recurrir a ensayos alternativos como la realización de perforaciones de pequeño diámetro con taladradoras adecuadas y recogida del polvo en bolsas o sobres.

Tanto los testigos como las bolsas se numerarán convenientemente identificando con claridad el lote o fracción al que pertenecen, así como su ubicación exacta, para lo que se acudirá al uso de croquis o fotografías del elemento en cuestión con la localización de los puntos de extracción de muestras.

Cuando se trate de las muestras para la determinación de cloruros o sulfatos, se intentará evitar el empleo de agua en la extracción de los testigos, ya que ésta produce un cierto lavado y puede disolver parte de los cloruros de la corteza del testigo. Ya que resulta prácticamente imprescindible el uso del agua en la extracción de las probetas testigo, se tratará de utilizar una velocidad de penetración máxima, lo que se consigue con una sonda en buen estado y el control del caudal de agua. Posteriormente se eliminará esta corteza.

Una forma de suprimir la corteza presuntamente lavada puede realizarse según indica la figura número III.1 (o de cualquier otra forma que se considere apropiada). Esta eliminación debe realizarse ya en seco, mediante una cortadora radial con disco abrasivo. El núcleo seco así preparado puede ya utilizarse en la determinación del contenido de iones agresivos.

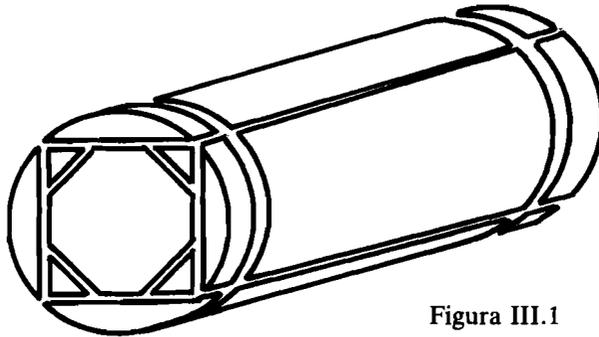


Figura III.1

Cuando interese conocer también el gradiente de concentración de cloruros a lo largo del espesor de hormigón, se fraccionará el núcleo seco mediante cortes transversales de forma que se obtengan unas porciones de al menos 100 g. de hormigón.

En todo caso el ensayo alternativo mediante la ejecución de taladros de pequeño diámetro es fácil, rápido y tiene la ventaja de realizarse en seco.

En cuanto al número de determinaciones necesarias para que cada tipo de ensayo resulte representativo de la muestra, dependerá de la dispersión del parámetro a determinar dentro de la población de elementos representados y de la variabilidad de los tipos de ambiente a los que se encuentre sometida la

estructura. Así, y como indicación general, 2 ó 3 determinaciones por tipo de ensayo resulta un mínimo imprescindible, y una media de 6 a 10 determinaciones puede ser suficiente cuando se encuentren dispersiones de cierta entidad.

III.1. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA MECANICA DEL HORMIGON

III.1.1. COMENTARIOS

Para determinar la resistencia del hormigón «in-situ» pueden utilizarse ensayos destructivos solamente o en combinación con ensayos no destructivos lo que resulta siempre lo más recomendable. Si se efectúan sólo ensayos destructivos, se recomienda extraer un mínimo de 10 probetas testigo de cada lote seleccionado.

Los métodos de ensayo no destructivos (E.N.D.), más utilizados actualmente son: a) Métodos de dureza superficial. b) Métodos ultrasónicos basados en la medida de velocidad de paso longitudinal de ultrasonidos. El campo de aplicación de los ultrasonidos está en el estudio de la uniformidad del hormigón en los distintos elementos estructurales, delimitando las zonas de hormigones de baja calidad, comparación de la calidad en términos de resistencia o módulo de elasticidad de los hormigones colocados en la misma estructura.

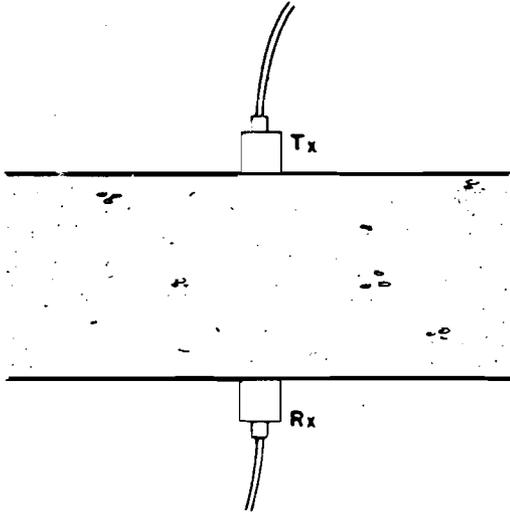
El método de la velocidad de propagación de los ultrasonidos puede ser utilizado en combinación con otros ensayos no destructivos, para mejorar la precisión de las estimaciones de la resistencia del hormigón.

En el presente apartado se darán algunas pautas sólo sobre el funcionamiento de los métodos ultrasónicos y de los esclerométricos.

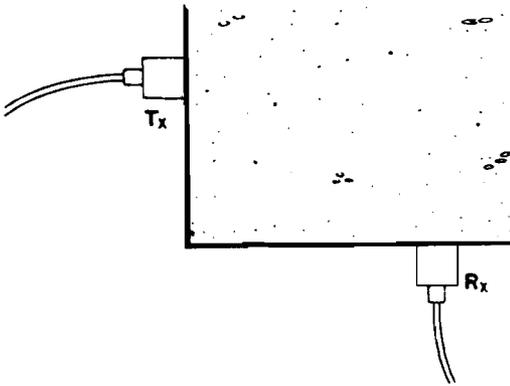
Entre las técnicas no destructivas que emplean *impulsos ultrasónicos*, la más utilizada en el caso del hormigón es la basada en «la velocidad de propagación del impulso». Dado que el hormigón debido a su constitución es suficientemente heterogéneo para las ondas elásticas de alta frecuencia (banda superior de ultrasonidos) y que, por otra parte es preciso operar con longitudes de onda relativamente pequeñas para poder hablar de trayectorias definidas, se adopta una solución de compromiso operando entre 40 y 50 kHz que se encuentra dentro de la banda baja de los ultrasonidos (véase figuras III.2, III.3 y III.4 de la norma UNE 83308-86).

La esclerometría se basa en que si la superficie del material no ha sufrido alteraciones, puede suponerse que existe una estrecha relación entre dureza superficial o resistencia al choque y la resistencia a compresión del material. Este método es el más difundido entre los profesionales de la construcción debido principalmente a la fácil realización de las medidas y al relativamente

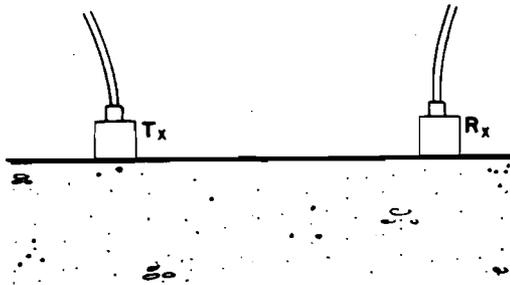
EMISOR T_x
RECEPTOR R_x



a. Transmisión directa



b. Transmisión semidirecta



c. Transmisión superficial

Formas de colocación de los palpadores

Figura III.2.—*Formas de colocación de los palpadores*

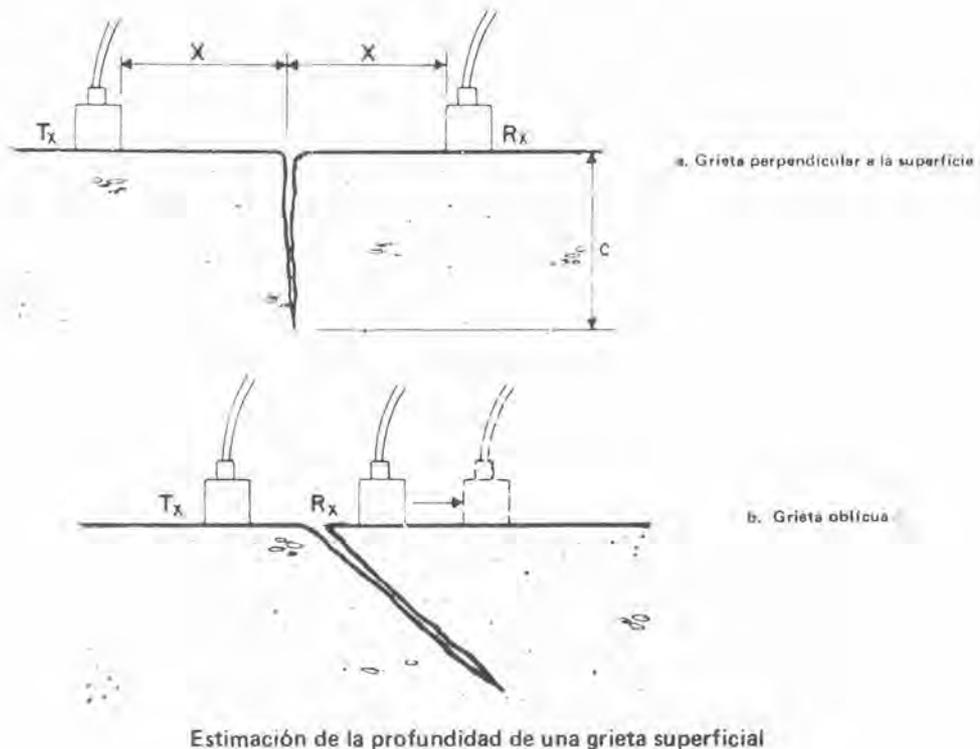


Figura III.3.—Estimación de la profundidad de una grieta superficial

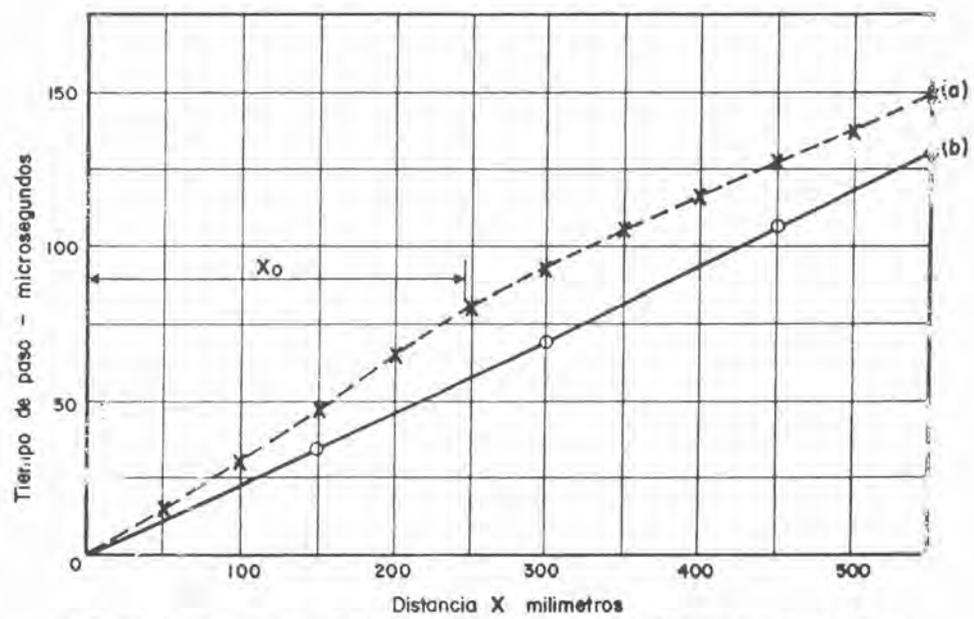
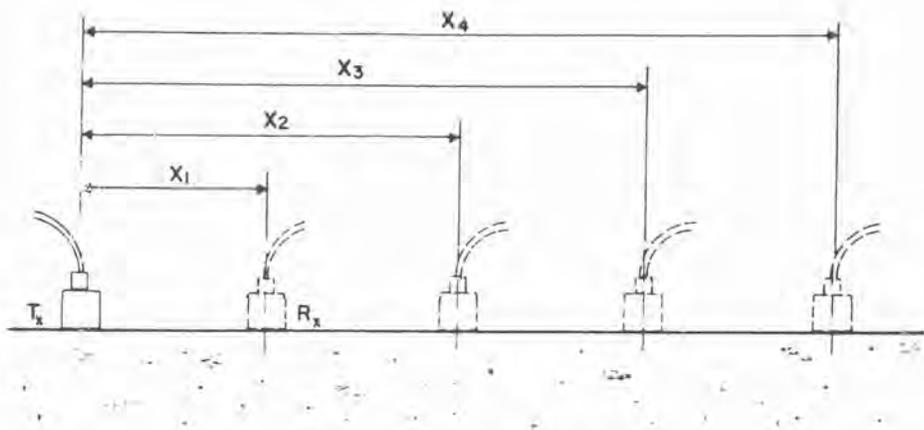
bajo costo de los aparatos. Sin embargo, los resultados que se obtienen deben ser analizados con muchas precauciones, ya que en ciertos casos se pueden cometer grandes errores a los que se hará alusión en el apartado siguiente.

III.1.2. METODOLOGIA

Existen en el mercado diversas marcas comerciales que describen la metodología concreta a utilizar en el caso del hormigón. Entre los instrumentos más conocidos que usan ultrasonidos está el PUNDIT y el aparato más conocido entre los esclerómetros es el SCHIMDT.

Ambas técnicas se basan en una calibración previa de los aparatos en piezas de hormigón de características análogas a las que se van a medir en obra o bien se deben corregir los resultados con otros obtenidos mediante rotura de testigos obtenidos en la propia obra cuyo material se trata de estudiar.

Los casos en los que se pueden cometer grandes errores utilizando estas técnicas, en especial la esclerometría, son aquellos en los que:



- a) Resultados para un hormigón con una capa superficial de 50 mm de calidad inferior
- b) Resultados para un hormigón homogéneo

Determinación de la velocidad de los impulsos por el método superficial:

Figura III.4.—

- La superficie del hormigón presenta un sobreendurecimiento respecto de su masa debido a una carbonatación superficial. De ser muy fina esta capa, se puede eliminar con la piedra de carborundum o con una radial. Esta circunstancia se puede detectar con el ensayo de la fenoltaleína.
- La superficie del hormigón está más reblandecida debido a un ataque químico, o existe una falta de adherencia entre el árido y la pasta cementante, que se puede observar en la forma de desprenderse los granos gruesos de grava.

Existen numerosas propuestas encaminadas a relacionar los resultados obtenidos por procedimientos no destructivos, a fin de mejorar la precisión de cada uno de ellos, si bien tal mejora no parece que pueda alcanzarse cuando uno de los métodos utilizados resultase sensiblemente menos preciso que los otros.

En cualquier caso, los métodos E.N.D., aún no siendo una alternativa a los métodos destructivos para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón, son útiles para delimitar zonas con distintas resistencias y con deterioros locales, facilitando la división en lotes y la delimitación, por tanto, de las zonas de extracción de testigos y de necesaria reparación.

La mejor manera de calibrar los resultados obtenidos con los métodos E.N.D. se alcanza tras el ensayo a compresión de probetas testigo. Las resistencias obtenidas deberán ser objeto de una valoración a fin de obtener un valor característico asociado a un cuantil del 5%, para lo cual se requiere en general el empleo de un estimador distinto al utilizado durante la ejecución de la estructura.

III.2. DETERMINACION DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS ARMADURAS

III.2.1. COMENTARIOS

De las armaduras interesa conocer su recubrimiento, posición, número y diámetro, las pérdidas de sección causadas por la corrosión y, en ocasiones, su límite elástico.

Los métodos electromagnéticos son los instrumentos conocidos genéricamente como «pachómetros», sirven para detectar la presencia y dirección de las barras, así como su espesor de recubrimiento, si: a) el campo de medición es inferior a 120 mm., b) se conoce el diámetro de las barras y c) su separación es superior a los 100-150 mm. Caso de no cumplirse las condiciones mencionadas las determinaciones cuantitativas pueden estar sometidas a considerables errores.

En algunas publicaciones se ha relatado la utilización de imanes calibrados, los cuales pueden mantenerse adheridos a las superficies verticales o a los techos de hormigón armado, cuando las armaduras se encuentren con espesores de recubrimiento menores que uno determinado, para el que esté calibrado el imán. En el caso de que la armadura estuviese más profunda el imán caería por su propio peso. El funcionamiento de tales imanes parece que sólo sería el adecuado, si se conociera previamente también el diámetro de la armadura, y éstos se calibraran teniéndolo en cuenta.

En cuanto a la determinación de la pérdida de sección causada por la corrosión, sólo es posible determinarla mediante ensayos destructivos, tanto extrayendo trozos de armadura en las zonas que se consideren más deterioradas, como «in-situ» previa realización de catas.

El límite elástico del acero se determina ensayando a tracción probetas extraídas de la propia obra.

III.2.2. METODOLOGIA

El funcionamiento y criterios de utilización de los resultados de los instrumentos que se utilizan para *medir el espesor de recubrimiento* depende de la marca comercial de cada uno.

Si en una estructura no se conociera con seguridad el diámetro de la armadura, se puede recurrir a una técnica relativamente destructiva consistente en localizar, en primer lugar, la situación exacta de las armaduras mediante el «pachómetro», marcando unos puntos sobre la superficie del hormigón, y en realizar posteriormente un taladro en tales puntos con una broca de «widia» de 8 ó 10 mm. de diámetro hasta encontrar la armadura. El orificio convenientemente limpio con aire a presión o con un pincel permite medir el espesor del recubrimiento con un calibre provisto de dispositivo para medida de fondos. El orificio conviene rellenarlo con mortero o resina epoxi, una vez finalizado el ensayo, con el fin de proteger la armadura.

Para la *medida de la pérdida de sección* debida a la corrosión, es necesario limpiar la armadura de los óxidos que contenga. Esta limpieza se puede efectuar mediante un cepillo de cerdas apropiadas o introduciendo una muestra de armadura en disolución de ácido clorhídrico 1:1 que contenga 2gr/l de hexametilentetramina (que actúa de inhibidor de la corrosión del acero y permite limpiar el óxido solamente). Con un calibre apropiado se determinará la pérdida de sección en varios puntos, tomando nota tanto de la media aritmética de las determinaciones, como de la máxima pérdida de sección. El valor medio puede permitir hacer una estimación aproximada de la velocidad de corrosión (pérdida en mm/año) si se conoce el momento en que la corrosión comenzó, la pérdida de sección máxima es la que permitirá hacer estimaciones de la disminución de sección de la barra. En barras corrugadas se considera el diámetro inicial el nominal y se tendrá precaución del lugar (valle o resalto) en el que se efectúa la medida de la merma de sección.

Finalmente, con respecto a las muestras que se toman para *determinar el límite elástico*, es conveniente extraerlas de las zonas sometidas a menores tensiones y nunca de la misma sección, además deberían tener separados sus extremos más próximos una distancia equivalente a su longitud de anclaje (véase tabla III.1).

ELECCION DEL LIMITE ELASTICO DEL ACERO "IN SITU"

f _y dentro del intervalo:	227,4 MPa. f _y 275,6 MPa.	275,6 MPa. f _y 344,5 MPa.	344,5 MPa. f _y 413,4 MPa.	413,4 MPa. f _y
valor de f _y a utilizar:	227,4 MPa.	275,6 MPa.	344,5 MPa.	413,4 MPa.

Tabla III.1

III.3. POROSIDAD Y DENSIDAD

III.3.1. COMENTARIOS

La medida de la porosidad de un hormigón se puede realizar mediante métodos muy sofisticados que permiten conocer no sólo la porosidad total, sino también el diámetro de los poros y el volumen porcentual de cada diámetro. Todos los métodos de medida que actualmente se utilizan son destructivos en cierta medida o no aportan datos completamente exactos, ya que el material (sea agua, mercurio, nitrógeno, etc.), que se introduce en el hormigón, afecta en cierto modo a su estructura interna y la falsea.

El valor de la porosidad de un hormigón nos puede aportar indicaciones sobre la calidad del mismo y puede ser un índice indirecto de su permeabilidad.

III.3.2. METODOLOGIA

Una porción de hormigón íntegra y libre de grietas de unos 5 × 5 × 10 cm. se deseca en una estufa a 105° C hasta peso constante, luego se introduce en un desecador hasta que adquiere la temperatura ambiente y en estas condiciones se pesa.

Después se sumerge en un vaso con suficiente cantidad de agua para que la cubra por completo. El vaso con la muestra se introducen en una campana o en un recipiente cerrado, al que se somete a vacío (1 mm de presión de Hg) durante 24 horas al menos. Transcurrido ese tiempo se extrae la muestra y se le seca el agua superficial con un paño poco absorbente e inmediatamente se pesa. Luego se vuelve a introducir en el agua y se vuelve a pesar suspendiendo la muestra directamente de la balanza sin extraerla del agua.

Si no se dispone de bomba para hacer el vacío, esta operación se puede sustituir por otro procedimiento que consiste en hervir la muestra dentro siempre del agua durante 2 horas, se deja enfriar durante 12 horas y luego se seca superficialmente antes de pesarla.

La porosidad por volumen del hormigón se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\text{Porosidad \%} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumerg}} \cdot 100$$

P_{sat} = peso de la probeta saturada (después del vacío o hervido).

P_{seco} = peso de la probeta seca.

P_{sumerg} = peso de la probeta saturada y sumergida en agua.

Todos los pesos se darán en gramos. Con estos valores también es posible calcular la densidad aparente y real del hormigón a través de las fórmulas.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumerg}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{sumerg}}$$

III.3.3. CRITERIOS DE VALORACION

- Valores de porosidad menores del 10% - indican un hormigón de buena calidad y compacto.
- Valores entre el 10 y el 15% - indican un buen hormigón, pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos.
- Valores superiores al 15% - son características de hormigones muy permeables e inadecuados para proteger a la armadura a largo plazo.

III.4. CONTENIDO EN CLORUROS

III.4.1. COMENTARIOS

Los cloruros se pueden encontrar dentro del hormigón de dos formas: como cloruros «libres», es decir en forma de iones en el agua contenida en los poros, que son los que pueden ser agresivos para las armaduras, y como cloruros «combinados», formando parte de las fases hidratadas del cemento, fundamentalmente como cloroaluminatos. La suma de libres y combinados se suele llamar cloruros «totales».

Aunque son los libres o solubles en agua los que en realidad pueden provocar la corrosión, es conveniente determinar también siempre el contenido de cloruros totales, ya que los cloruros combinados pueden volver a la disolución y tornarse agresivos por fenómenos como la carbonatación o una elevación de la temperatura. El contenido en cloruros totales, ayuda también a hacer estimaciones por comparación, del grado de contaminación del hormigón. Además casi todas las normas establecen un límite al contenido de cloruros en forma de cloruros «totales».

También las distintas normativas contemplan este límite en unos casos referido al contenido en cemento del hormigón, pero en otros lo refieren al total del hormigón y en algunos limitan el contenido en cada uno de los componentes del mismo.

Son varios los métodos que se puede utilizar para determinar el contenido en cloruros, desde los químicos clásicos (Mohr y Volhard) hasta el nefelométrico o el de electrodo selectivo. A continuación se va a describir la determinación según el método de Volhard, aunque la preparación de la muestra es similar en todos los métodos.

III.4.2. METODOLOGIA

Se puede seguir la Norma UNE 80240-86, ASTM D 1411 o proceder como sigue. Al menos 100 gr. de muestra seca, se tritura hasta que pase por el tamiz 0,16 UNE 7050. Posteriormente se homogeniza cuidadosamente y se vuelve a secar en estufa a 105° C.

Para determinar los *cloruros solubles en agua o libres*, se toma mediante cuarteo de la muestra triturada y seca, una porción de unos 20 gr. pesados con aproximación de 1 mg. y se introduce en un Erlenmeyer de 500 ml. provisto de boca esmerilada. Se adicionan a la muestra unos 200 ml. de agua destilada. Se agita bien durante 1 hora hasta disolver la muestra lo más posible. Luego se filtra en un buchner bajo succión utilizando un papel de filtro de porosidad media y se lava el residuo varias veces con agua.

El filtrado y las aguas de lavado se traspasan a un frasco Erlenmeyer de 500 ml. y se acidulan con 10 ml. de HNO_3 concentrado, luego se añade disolu-

ción 1 M de $AgNO_3$ con una bureta hasta que se aprecie que todo el cloruro ha precipitado. Entonces se añaden 5 ml. más de la disolución de $AgNO_3$ 1 M y se calienta a ebullición para coagular el precipitado de $AgCl$.

Se deja enfriar a temperatura ambiente, se añaden 10 ml. de alcohol benílico y se agita fuertemente. Se adicionan 10 ml. de indicador de Volhard y se valora el exceso de nitrato de plata con NH_4SCN 1M hasta que aparezca una coloración rojiza permanente.

Para determinar *los cloruros totales*, se procede de manera similar, excepto en la disolución inicial de la muestra una vez triturada que se realiza en 50 ml. de agua añadiendo 10 ml. de HNO_3 1:4. Se calienta hasta que se observe la muestra completamente atacada. Es conveniente añadir un poco más de ácido para asegurar que hay un exceso de HNO_3 . Finalmente se enfría y filtra y se continúa la valoración como antes se ha indicado o mediante el método de Mohr.

El contenido en cloruros se puede dar referido al peso de la muestra de hormigón o al de la proporción de cemento.

III.4.3. CRITERIOS DE VALORACION

No existe un acuerdo sobre el límite de cloruros por debajo del cual se pueda asegurar que no va a producirse el ataque de las armaduras, ya que depende de numerosas variables como son: el tipo de cemento, su finura y contenido en aluminato tricálcico, la proporción de cemento por m^3 de hormigón, el estado superficial de acero, etc. Así pues, las normativas de los diferentes países no coinciden y proponen límites diferentes.

También es necesario distinguir entre que el acero de la armadura se des-pasive y entre que se corroa a tal velocidad que afecte al hormigón y a la seguridad y estética de la estructura, dado que se puede producir una corrosión por cloruros, pero tan lenta que no aparezcan daños visibles de la misma en muchos años.

Como límite muy general se considera que el 0,4% en relación al peso de cemento o el 0,05-0,1% en relación al peso del hormigón son cantidades suficientes de cloruros para des-pasivar el acero. Aún así, se han encontrado armaduras corroídas en hormigón con contenidos inferiores a los citados y armaduras no corroídas en hormigones con cantidades de cloruros incluso muy superiores a ese límite. La norma española EH-88 prescribe el 0,4% en relación al peso de cemento y la EP-80 el 0,1%.

Los resultados del contenido en cloruros dan una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño, pero no se pueden tomar como un límite matemático sin la interpretación basada en la experiencia del técnico correspondiente.

III.5. CONTENIDO EN SULFATOS

III.5.1. COMENTARIOS

Aunque los sulfatos no tienen un efecto tan nocivo sobre las armaduras como los cloruros, son también iones despasivantes, y su determinación resulta conveniente, ya que permite valorar si el hormigón del recubrimiento ha podido verse afectado por el ataque de estos iones y provocado un aumento de la permeabilidad debido a expansiones y agrietamientos típicos del ataque por sulfatos.

Si los sulfatos se encuentran en el exterior del hormigón, al penetrar a través del recubrimiento, provocan en primer lugar una cierta expansión al formarse los sulfoaluminatos expansivos ya bien conocidos. Este agrietamiento superficial del recubrimiento va a producir una mayor permeabilidad del mismo y una menor protección de la armadura, que se puede corroer ya no tanto por una despasivación del tipo de la que producen los cloruros, sino por el efecto sinérgico de un deterioro simultáneo del recubrimiento.

III.5.2. METODOLOGIA

Antes de determinar el cuantitativo de azufre total, en el hormigón que se puede realizar perfectamente y con una gran precisión analítica, por la UNE 83.120, se recomienda un análisis cualitativo de sulfuros en el hormigón. En el caso de que sea negativo, solamente se tendría que realizar el contenido en sulfatos, eliminando el azufre total.

• **Análisis cualitativo de sulfuros en hormigones**

Fundamento: Tanto el ión sulfuro, como el SH_2 precipitan el SPb negro, con soluciones de sales de plomo poco ácidas, neutras o alcalinas.

Reactivo: El PbO_2Na_2 , se prepara añadiendo $NaOH$, a una disolución de $(CH_3COO)_2Pb$, 1N, hasta redisolución del precipitado de $Pb(OH)_2$.

Método n.º 1. Se toman unos 10 gr. de hormigón molido, que pase por el tamiz 0,63 UNE 7050 y sea retenido por el tamiz 0,32 UNE 7050. Se lleva esta muestra a una cápsula de níquel o de hierro, de unos 125 ml. de capacidad. Se agregan ahora del orden de 40 gr. de $NaOH$, se funde con cuidado, a una temperatura de 450° C.

Una vez fría la cápsula, se toma una porción de la masa fundida fría y se lleva a un erlenmeyer de 600 ml. de capacidad, agregándose 20 ml. de agua.

A continuación se agregan, gota a gota, CIH (1:1), sobre el erlenmeyer con la muestra a analizar y se calienta el recipiente. En caso de presencia de

sulfuros, los gases que se desprenden serán de SH_2 . Se recogen sobre papel de filtro humedecido con unas gotas de solución de reactivo de plumbito sódico. Este pasa a negro, en presencia del SH_2 .

Ante una presencia franca de sulfuros, la mancha en el papel es de color negro-metálico.

Método n.º 2.

En vez de fundir con $NaOH$, la muestra se ataca con ClH (1:1), recogién-dose los gases en un papel de filtro humedecido con solución de plumbito sódico.

Coloración negra, presencia de sulfuros desplazables por el ClH .

Análisis cuantitativo de sulfatos

La muestra para determinar el contenido de sulfatos debe obtenerse de la misma forma que se indicó para la determinación de los cloruros; por tanto, puede utilizarse una parte de la misma triturada y seca.

Se pesa, entonces, con aproximación de 1 mg. una porción de unos 5 g. de dicha muestra triturada y seca en un vaso de 250 ml. Se añaden 25 ml. de agua destilada fría y 10 ml. de HCl concentrado, poco a poco y removiendo con varilla de vidrio.

Se calienta en baño, cubriendo el vaso con un vidrio de reloj, y se remueve de vez en cuando hasta que se observe un ataque completo. Se diluye con 50 ml. de agua destilada caliente y se deja en digestión sobre el baño durante 15 minutos. Se filtra en caliente utilizando papel de filtro de porosidad media y se lava varias veces con agua caliente.

El filtrado, llevado a 250 ml. se calienta a ebullición y se añaden gota a gota 10 ml. de disolución caliente de $BaCl_2$ al 10% y se continúa la ebullición unos minutos. Se deja el vaso tapado, en digestión, entre 12 y 24 horas, transcurridas las cuales se filtra el precipitado, utilizando papel de baja porosidad, y se lava con agua caliente hasta la desaparición de los cloruros en las aguas de lavado. El precipitado se calienta entre 900 y 1000° C en crisol previamente tarado y se pesa después.

III.5.3. CRITERIOS DE VALORACION

El contenido en sulfatos de un hormigón depende de la proporción de cemento y del contenido en yeso del citado cemento. Así por ejemplo, un hormigón de densidad $2,3 \text{ g/cm}^3$ con 350 kg. de cemento/ m^3 , cuyo cemento pudiera contener como máximo un 3% de yeso, daría un contenido máximo en sulfatos del 0,46% por peso de muestra. Si contiene la muestra cantidades superiores es porque las ha adquirido durante el amasado (aditivos) o han penetrado desde el exterior.

III.6. PROFUNDIDAD DE CARBONATAACION

III.6.1. COMENTARIOS

El dióxido de carbono del aire penetra a través de la red de poros del hormigón y reacciona con los constituyentes alcalinos del cemento, sobre todo con el hidróxido cálcico. Este proceso conduce a la formación de carbonatos cálcicos y alcalinos y a una reducción del valor del pH de la solución acuosa contenida en los poros, que resulta finalmente con un valor de pH cercano a la neutralidad.

Similar fenómeno de reducción del pH se produce si el hormigón está en contacto con agua en circulación o ligeramente ácida. En este caso el pH se reduce por un efecto de «deslavado» que lixivia todas las sales contenidas en los poros y en último extremo puede provocar la desintegración del propio hormigón.

La profundidad de la capa superficial carbonatada o deslavada se llama «profundidad de carbonatación» y la reducción de su pH se hace visible por el cambio de color de un indicador apropiado.

Como indicador más adecuado se utiliza una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico.

Esta solución es incolora en pH inferiores a 8. Para valores de pH superiores a 9,5 se torna de color rojo púrpura. Entre 8 y 9,5 el indicador forma una coloración del rosa al rojo-púrpura según evoluciona el pH desde 8 a 9,5 (figura número I.13).

III.6.2. METODOLOGIA

La determinación se debe realizar sobre una porción de hormigón de la superficie del elemento objeto de estudio. Tal y como se mencionó para el caso de los cloruros la extracción se debe realizar en seco. También es posible realizar el ensayo sobre un orificio practicado en seco.

No es necesario que las porciones tengan una geometría particular basta que tengan unas dimensiones suficientes para averiguar desde uno de los lados, que debe ser la superficie de la estructura, la posible profundidad de la capa carbonatada. Si se practican orificios desde la superficie, éstos deben tener el tamaño adecuado para permitir la medida.

La medida se debe efectuar siempre sobre una fractura fresca, ya que las superficies se carbonatan rápidamente, por lo que, si se han de extraer testigos que luego se ensayarán en el laboratorio, aparte de conservarlos en recipientes estancos y con el menor contenido en aire posible, luego la medida se efectuará sobre la fractura fresca de los testigos.

Conseguida una fractura reciente y perpendicular a la superficie del elemento de hormigón objeto del estudio, se pulveriza una solución de fenolfta-

leña al 1%. Pasados 1 ó 2 minutos para que tome color el indicador se mide el espesor de la capa incolora con una precisión de 0,5 mm.

Si la línea de cambio de color es ondulada, se toman valores en unos 10 puntos y se indica la media aritmética y la profundidad máxima. Se debe realizar alguna medición en zonas como las esquinas o alrededor de áridos gruesos en contacto con la superficie donde es de esperar mayores profundidades de carbonatación, anotando también estos valores máximos.

Si el color no es rojo púrpura sino rosado, se anota esta eventualidad, así como su profundidad y frecuencia. Las fotografías son una ayuda complementaria muy valiosa en estas medidas.

Si se necesita estabilizar temporalmente la coloración se puede pulverizar una resina transparente sobre la zona ensayada, una vez que se haya secado la fenolftaleína.

III.6.3. CRITERIOS DE VALORACION

La principal indicación que se pretende con esta medida es conocer si la carbonatación ha llegado o no hasta la armadura, para poder establecer si ha provocado o contribuido al deterioro de la estructura.

No todos los hormigones se carbonatan a la misma velocidad, ya que ésta depende de numerosas variables como: la proporción de cemento en el hormigón, la porosidad de éste, del tipo de cemento, de la humedad ambiente, etc. De forma general se acepta que la capa carbonatada es función de la raíz cuadrada del tiempo, según la ley:

$$X = K \sqrt{t}$$

X = capa carbonatada en cm.

t = tiempo en años o meses.

K = constante.

El valor de K se puede determinar si se conoce el grosor de la capa carbonatada y la edad de la estructura y una vez conocida K , se puede predecir la velocidad de avance de la capa carbonatada y, por lo tanto, el tiempo que tardará en llegar hasta la armadura si no la ha alcanzado en el momento de realizar la inspección.

III.7. DETERMINACION DEL CONTENIDO EN HUMEDAD

III.7.1. COMENTARIOS

El contenido en humedad del hormigón es la variable que controla tanto el acceso de oxígeno u otros gases (carbónico, sulfuroso, etc.), hasta la armadura, como la resistividad del hormigón, es decir es la variable que incide más

directamente sobre la velocidad de corrosión. Así, si los poros están saturados de humedad, aunque la resistividad del hormigón será la más baja posible, el acceso de oxígeno estará dificultado al tener que llegar hasta la armadura por difusión a través del agua. Cuando los poros están casi secos, el oxígeno llega con facilidad pero la resistividad será muy elevada permitiendo velocidades de corrosión muy bajas. Los contenidos de humedad que permitan una resistividad baja, pero no saturen los poros serán las que permitirán las velocidades de corrosión máximas.

No existen todavía correlaciones entre contenidos de humedad y velocidad de corrosión, pero a continuación se describe una metodología simple para cuando se considere oportuno conocer esta variable.

III.7.2. METODOLOGIA

El contenido en humedad de un hormigón se calcula mediante la simple diferencia entre el peso de la muestra sometida a una humedad ambiental concreta y el peso después de estar la muestra 24 h. en estufa a 105 °C, o sometida a vacío.

En el caso de que la muestra sea extraída en obra se debe introducir inmediatamente en un frasco hermético. La muestra húmeda se pesará dentro del frasco, luego se extraerá de él y tanto la muestra como el frasco destapado y su tapa se meterán en una estufa a 105 °C o en la cámara de vacío (el frasco debe ser de un material que no se altere con la temperatura en el caso de la estufa) y se pesarán finalmente para hallar el contenido en humedad evaporada de los poros de la muestra.

Si se conoce el valor de la porosidad de una muestra gemela de hormigón o se efectúa el ensayo con posterioridad al de determinación de la humedad, es posible obtener datos porcentuales de la saturación en humedad de los poros a partir del peso de la muestra saturada de agua (P_{sat} en III.3.). Así, el % de saturación en humedad podría expresarse como:

$$\% \text{ saturación} = 100 \cdot \frac{P_m - P_{seca}}{P_{sat} - P_{seca}}$$

siendo: P_m el peso de la muestra a la humedad del ensayo, P_{seca} el peso después de desecar a 105 °C y P_{sat} , cuando la muestra se satura de agua mediante vacío o ebullición.

En caso de que se quiera expresar el contenido en humedad en volumen o peso por m^3 de hormigón la expresión sería:

$$\frac{\text{l ó Kg de humedad}}{m^3 \text{ hormigón}} = \frac{[P_m (kg) - P_{seca} (kg)]}{P_{sat}(kg) - P_{seca}(kg)} \cdot 10^3$$

III.8. RESISTIVIDAD

III.8.1. COMENTARIOS

La resistividad eléctrica del hormigón es uno de los dos parámetros junto con la disponibilidad de oxígeno que controlan la velocidad de corrosión del acero embebido en hormigón. La resistividad depende fundamentalmente de la humedad contenida en los poros del hormigón.

Esta variable puede determinarse por diversos métodos, como el conocido como «de los cuatro puntos» que se utiliza muy frecuentemente en el caso de suelos (figura III.5). Aquí se va a describir el que se basa en utilizar un contraelectrodo puntual enfrentado a una armadura de longitud quasi-infinita, que también se utiliza en la determinación de la resistencia eléctrica de suelos (norma ASTM G 57-78).

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I}, \text{ en } \Omega \times \text{m}$$

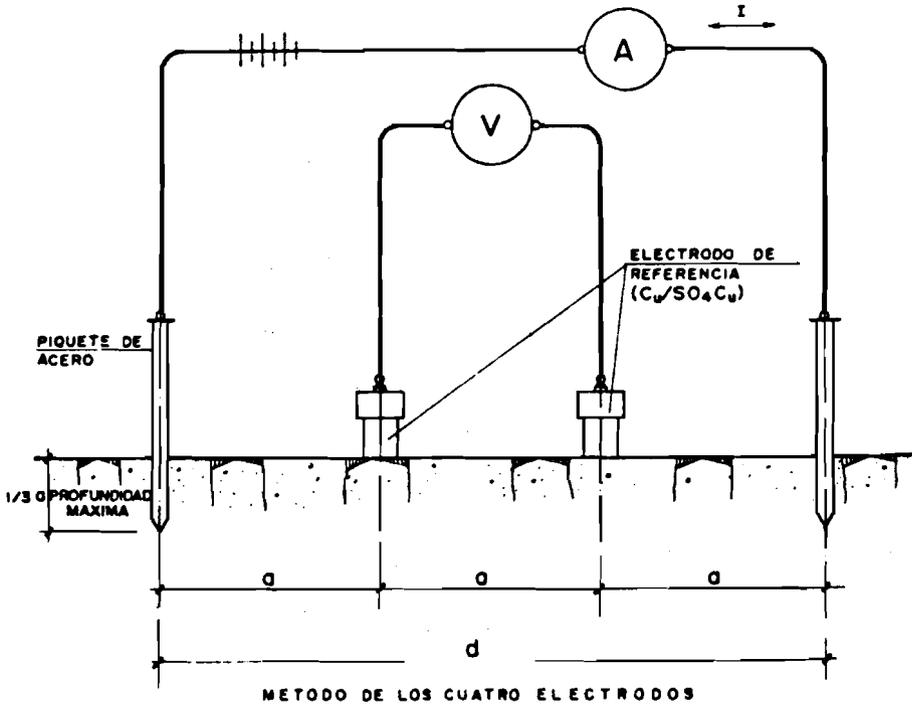


Figura III.5.—Método de medida de la resistividad del terreno de «los cuatro electrodos» debido a Wenner y fórmula para el cálculo.

III.8.2. METODOLOGIA

Se utilizará como electrodo auxiliar un disco metálico de diámetro D tal, que la distancia entre la superficie del hormigón y la armadura sea mayor que $1,5 D$, al que se habrá soldado un cable para facilitar la conexión eléctrica al aparato de medida, o en el que se habilitará, de la forma que parezca más conveniente, que dicha conexión se pueda efectuar. El otro polo lo constituirá la propia armadura a la que se facilitará el acceso eléctrico mediante una cata.

La resistencia eléctrica se medirá utilizando exclusivamente corriente alterna con objeto de obtener medidas fiables sin polarizar los electrodos. La frecuencia de medida será superior a 10 Hz. También se puede utilizar para efectuar esta medida un potencióstato con realimentación positiva. En este caso se corto-circuitarán el electrodo de referencia con el auxiliar y la terminal del electrodo de trabajo es la que se conectará a la armadura.

El electrodo auxiliar se desplazará a lo largo del elemento con el fin de conocer si la resistencia varía mucho (debido a contenidos de humedad diferentes). Se debe considerar una variación importante aquella que es superior a un orden de magnitud. Si la variación encontrada es inferior se darán los resultados promediando los valores obtenidos. Si las variaciones encontradas son superiores a un orden de magnitud, se darán todos los resultados sin promedio alguno.

El valor de la resistividad viene dado en este caso por la fórmula:

$$\rho = 2 \cdot Roh \cdot D$$

ρ = resistividad
 Roh = la medida por el aparato en ohmios.
 D = diámetro del electrodo auxiliar.

III.8.3. CRITERIOS DE VALORACION

En la figura número I.27 se mostró la relación encontrada entre la resistividad del hormigón y la velocidad de corrosión. Esta relación se debe tomar de forma aproximada debido a la dispersión encontrada, pero en todo caso puede dar una idea del orden de magnitud de la velocidad de corrosión. Este valor puede utilizarse posteriormente para el cálculo de la vida residual de la estructura.

Otro de los factores que puede influir en que la relación entre la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión sólo sea aproximada, es la posible existencia de corrientes galvánicas en la estructura. En este caso la corrosión de las zonas que actúan de ánodo sería superior y la de las que actúan de cátodo, inferior a las que se podrían deducir de los valores de la resistividad.

III.9. MEDIDA DEL POTENCIAL DE CORROSION

III.9.1. COMENTARIOS

El potencial electroquímico de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de las mismas. Aporta indicaciones meramente cualitativas que se deben utilizar siempre como complemento de otro tipo de ensayos y nunca de forma aislada.

La medida consiste en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en contacto con la superficie del hormigón. Ver figura número III.6. La adopción de un electrodo de referencia particular es equivalente a la elección arbitraria de un punto cero en la escala de potenciales.

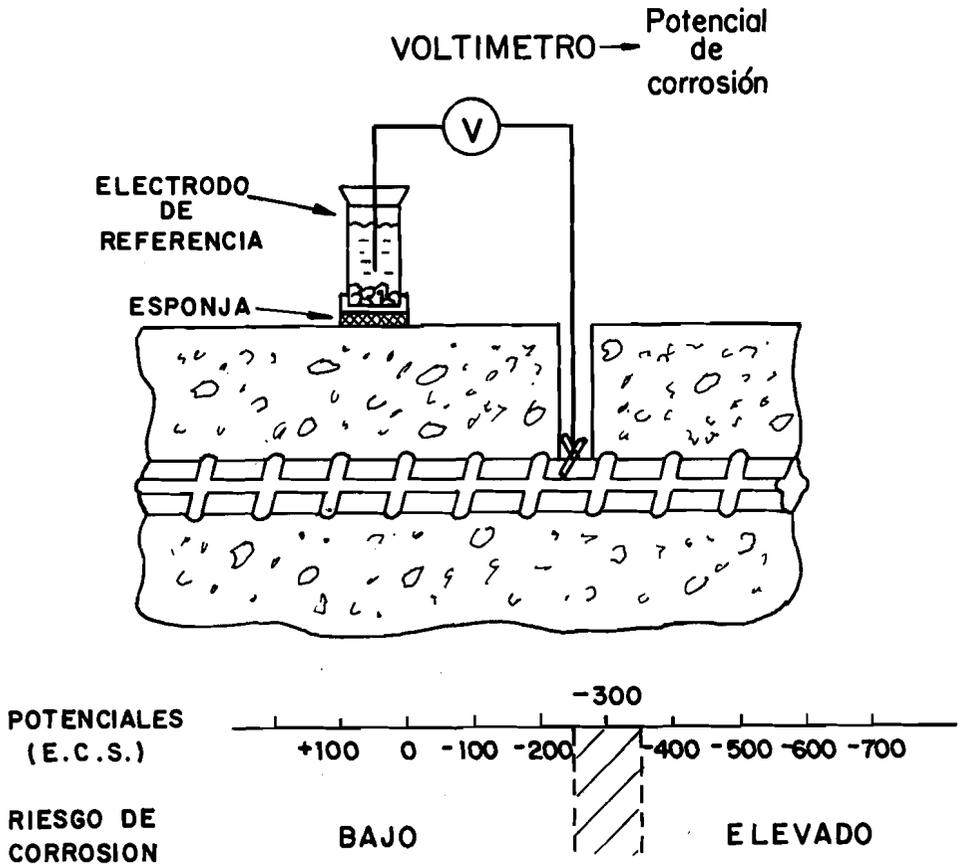


Figura III.6.

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 sobre la cuantía de la corrosión, sino sólo sobre la probabilidad de que este proceso se esté produciendo o no.

La medida del potencial de corrosión resulta imprescindible en la supervisión y posterior control de estructuras que van a ser o están sometidas a protección catódica.

Las principales circunstancias que pueden conducir a conclusiones erróneas en las medidas de potencial son:

1. El contenido en humedad del hormigón.
2. Contenido de oxígeno.
3. Diferentes espesores de recubrimiento.
4. La presencia de fisuras o grietas en el hormigón.
5. La existencia de corrientes erráticas.

1. Según el hormigón se encuentre seco o húmedo, la misma medida de potencial puede variar unos pocos milivoltios o incluso 100-200 mV (el hormigón húmedo siempre da lugar a potenciales más negativos). Zonas secas y húmedas en una misma estructura pueden dar por tanto diferencias en potencial que no podrían ser atribuibles a un mayor riesgo de corrosión, sino a un diferente contenido de humedad en contacto con la armadura. Por ello se recomienda humedecer ligeramente el hormigón de forma homogénea antes de proceder al muestreo del potencial. Si ello no es posible se deberá tener en cuenta muy cuidadosamente la situación de sequedad o humedad en que se encuentran las zonas de la estructura sometidas a la supervisión.

2. La falta de oxígeno cerca de las armaduras, produce también unos valores de potencial mucho más negativos que cuando la estructura está bien aireada. Esta circunstancia hay que tenerla en cuenta cuando se supervisan estructuras sumergidas o enterradas donde la oferta de oxígeno está limitada, para no atribuir riesgos mayores a los potenciales más negativos, cuando en realidad una menor oferta de oxígeno está limitada, para no atribuir riesgos mayores a los potenciales más negativos, cuando en realidad una menor oferta de oxígeno lleva a velocidades de corrosión más pequeñas, aunque los potenciales sean más negativos.

3. Debido a la elevada resistividad del hormigón sobre todo cuando está seco, el potencial que se mide en la superficie no es el mismo que tiene el acero si lo midiéramos mediante una sonda que llegara hasta la misma superficie de la armadura. Esta circunstancia hace que puedan medirse potenciales diferentes para el mismo estado de una armadura situada a diferentes profundidades en el hormigón.

4. La presencia de grietas o desperfectos, además de poder provocar una corrosión localizada sobre la armadura hace variar la resistividad del hormigón, por lo que los potenciales que se miden pueden resultar falseados por una resistividad del medio heterogénea.
5. La existencia de corrientes erráticas normalmente dará lugar a detectar potenciales muy alejados de los valores habituales que se miden en hormigón.

La medida del potencial de corrosión se puede aplicar tanto a probetas pequeñas en el laboratorio como a estructuras de gran tamaño, con independencia de su geometría.

Las medidas se pueden realizar aisladas o bien de forma sistemática y predeterminada, lo que permite delimitar el «mapa de potenciales» de la estructura. Esta última modalidad puede resultar muy útil a la hora de planear la reparación de una estructura, ya que se pueden identificar las zonas posiblemente corroídas y las zonas donde la armadura permanece pasiva.

III.9.2. METODOLOGIA

Zonas de medida - Para realizar un mapa de potenciales es necesario definir el espaciamiento en la longitud de la «retícula» que servirá de base de medida. La distancia elegida dependerá en cada caso. Cuando las medidas se vayan a efectuar de forma asistemática se definirán las zonas donde se pretende medir identificando en ellas las posibles fuentes de error descritas en el apartado anterior (humedades discontinuas, grietas, espesor de recubrimiento, etcétera).

Humectación del hormigón - Se procederá a humedecer de forma homogénea la superficie sobre la que se va a medir. Si la humedad ambiental es habitualmente elevada o ha llovido recientemente, esta operación no es necesaria. En todo caso es necesario recordar que los criterios de interpretación que se establecerán en un apartado posterior, están especificados para un hormigón que no esté seco.

El hormigón se humedecerá al menos 15 o 30 minutos antes de las medidas, con agua potable. No se debe saturar completamente, sino simplemente humedecer.

Debido a la higroscopicidad de los cloruros, el hormigón contaminado de esta sustancia suele estar mucho más húmedo de lo que sería de esperar por la humedad ambiental.

Contacto eléctrico con las armaduras - Se establecerá mediante la oportuna perforación para establecer un contacto directo de ésta con el borne del aparato de medida.

Electrodo de referencia - Normalmente se utiliza un electrodo de calomelanos saturado, ECS aunque también es común el electrodo de $Cu/Cu SO_4$. El

E.C.S. tiene un potencial de +241 mV a 20 °C con respecto al de hidrógeno y el de $Cu/Cu SO_4$ de +316 mV. Es necesario comprobar que la membrana de contacto está en buen estado de conservación, antes de cada medida.

Contacto con el hormigón - Para asegurar un buen contacto entre el electrodo de referencia y el hormigón y no dañar el electrodo, se utiliza una esponja o un papel de filtro ligeramente humedecidos.

Instrumentación - Cualquier milivoltímetro con elevada impedancia interna es válido para realizar las medidas. El instrumento debe tener una exactitud mínima de ± 1 mV. En obra se recomienda el uso de aparatos portátiles.

Realización de las medidas - Las armaduras serán conectadas siempre al polo (+) o rojo del milivoltímetro y el electrodo de referencia al polo (-) o negro.

Si las medidas a realizar son muy numerosas se recomienda utilizar un sistema de fichas donde se puede identificar con precisión la ubicación del punto de medida y los detalles que se aprecien sobre el aspecto de las armaduras o del hormigón. También puede ser utilizado un sistema informatizado de recolección de datos.

III.9.3. CRITERIOS DE VALORACION

Tomando como referencia el E.C.S., el riesgo de corrosión en función del potencial medido en hormigón húmedo, es el indicado en la figura III.6.

En el caso de los mapas de potencial, se trazarán líneas equipotenciales, lo que permitirá, en su caso, ubicar las zonas de mayor riesgo de corrosión.

CAPITULO IV

ALGUNAS INDICACIONES GENERALES DE COMO REDACTAR UN INFORME DE INSPECCION Y DIAGNOSTICO

La redacción de un informe posterior a una visita de inspección puede realizarse de muy diversas maneras, y en cada caso, se debe tener en cuenta muy particularmente cuáles son los objetivos del peticionario con el fin de dar cumplida satisfacción a sus requerimientos. Lo que se expone a continuación sólo pretende ser una guía orientativa para aquellos que no tengan experiencia previa en la redacción de informes.

Un informe de inspección a una estructura dañada por corrosión de armaduras, puede contar con los siguientes capítulos:

1. Antecedentes.
2. Objeto del expediente.
3. Visitas efectuadas y descripción de los daños o lesiones.
4. Análisis realizados en las muestras extraídas.
5. Causas de los daños.
6. Medidas a tomar y recomendaciones.
7. Conclusiones.

En los *antecedentes* se deben relatar todos aquellos datos que el peticionario haya comunicado como datos de partida, así como nombrar a los técnicos que efectúan la inspección y las personas que los atienden por parte del peticionario.

El *objeto del Informe* debe ser lo más breve y conciso posible y es donde se deben especificar las cuestiones que el peticionario plantea para que le sean resueltas.

La *descripción de los daños y visitas* puede ser uno de los capítulos más largos. Conviene mencionar todos aquellos detalles que se considere que influyen en el diagnóstico que finalmente se realice. Como se indicó en el capí-

tulo correspondiente debe estar ilustrado con fotografías y todos aquellos aspectos constructivos o de tipos de agresividad ambiental que se considere de interés.

En cuanto al *análisis de las muestras* es necesario especificar los lugares exactos de donde se extrajeron las mismas, el plan de muestreo decidido, así como los métodos de ensayo utilizados en cada medida. Los valores de los distintos parámetros deben estar claros con sus unidades de medida correctas. Se debe efectuar siempre una valoración crítica de los resultados obtenidos en cada tipo de ensayo.

En el capítulo de *causa de los daños*, se debe hacer una breve introducción general de cuales son las causas (cloruros y carbonatación y en su caso, corrosión bajo tensión) que desencadenan la corrosión de armaduras, así como de la influencia de la calidad del hormigón (permeabilidad) y del contenido en humedad en la velocidad a la que se desarrolle el proceso. Se debe insistir en que esta introducción general debe ser breve y sin una descripción prolija, haciendo referencia a publicaciones o libros en caso de que el peticionario desee ampliar sus conocimientos.

Sin embargo, la justificación directa de las causas de los daños sí debe ser detallada y todo lo extensa que cada caso requiera, intentando correlacionar las diversas variables que puedan influir o planteando las cuestiones que queden dudosas. El diagnóstico sobre la situación debe quedar claramente planteado.

En relación a *las recomendaciones sobre medidas a tomar* deben tener relación directa con el caso objeto de estudio, planteando incluso diversas soluciones alternativas cuando ello sea posible. Si se conocen sistemas de reparación eficaces, es aquí el capítulo para describirlos.

Las *conclusiones* finales deben redactarse de forma que resuman claramente las observaciones efectuadas, el diagnóstico de los daños y las recomendaciones sugeridas.

CAPITULO V

VIDA RESIDUAL DE UNA ESTRUCTURA DAÑADA POR CORROSION DE ARMADURAS

Una estructura debe cumplir con los requisitos mínimos de seguridad, funcionalidad y aspecto externo que le sean exigibles, en función de las acciones e influencias ambientales que se prevean durante su vida útil.

Si se detecta o sospecha la corrosión de las armaduras, existe una circunstancia que deberá verificarse previamente a cualquier otra consideración: el establecimiento de la integridad del conjunto de la estructura, de sus elementos y de sus cimentaciones. Así pues deberá procederse a una evaluación preliminar de la capacidad resistente de la estructura, a fin de decidir acerca de la necesidad de tomar medidas de seguridad con urgencia.

La evaluación final se practicará, generalmente, tras una inspección especial, consistente en una inspección visual completada con la auscultación de parámetros característicos del comportamiento de la obra y el estudio de todos los documentos existentes acerca del proyecto y ejecución, tales como códigos utilizados, análisis estructural, planos, especificaciones, estudios geotécnicos, resúmenes de inspecciones previas y cualquier otro dato relevante referente al control de calidad.

V.1. ESTIMACION DE LA RESISTENCIA MECANICA RESIDUAL

Por vida útil residual se puede definir como el período de tiempo en el que la estructura cumple las prestaciones para las que fue calculada sin costos importantes de mantenimiento.

La evaluación de la resistencia mecánica residual de una estructura dañada por corrosión de armaduras no es una cuestión resuelta, ya que hay muchos aspectos todavía no suficientemente estudiados. Su estimación aproximada puede abordarse desde diferentes perspectivas: a) mediante pruebas de carga o b) por vía analítica y c) mediante modelos empíricos.

La utilización de *pruebas de carga* en el caso de estructuras dañadas por corrosión de armaduras no resulta apropiada. A la conocida dificultad que entraña relacionar *déformabilidad* con resistencia en este tipo de pruebas, se añade la incertidumbre sobre los daños reales que pueden permanecer ocultos como fallos de adherencia, anclaje o empalmes, así como mermas de sección de armadura muy localizadas. Todo ello puede dar lugar a que, por efecto de la carga aplicada, aparezcan fallos adicionales o incluso el colapso de la estructura.

Cuando el mecanismo de deterioro es la corrosión de armaduras, el acometer el cálculo de la resistencia residual de estructuras conocidas por *vía analítica* no es una cuestión abordable con el estado actual de los conocimientos.

Un tercer procedimiento alternativo para establecer la seguridad residual ν de la estructura lo constituyen los *modelos empíricos* de evaluación, basados en la clasificación previa del nivel de daños y que supone la aceptación de un considerable margen de incertidumbre. Un modelo de este tipo ha sido descrito en el Boletín número 162 del CEB, y a continuación se describen sus bases muy someramente.

Se define un margen de seguridad m por medio de la relación:

$$m = \frac{R' - S'}{R'}$$

R' = resistencia residual de estructura.
 S' = la sollicitación que la estructura debería resistir de acuerdo con el código nacional correspondiente bajo la combinación de cargas pésimas.

Y una resistencia residual relativa ν como el cociente:

$$\nu = \frac{R'}{S'}$$

Para estimar esta resistencia residual se procede en primer lugar a realizar una clasificación de niveles de daños. En la tabla número II.1 se mostró la clasificación expuesta en el Boletín del CEB antes aludido. Establecidos los niveles de daños la resistencia residual relativa ν puede obtenerse de la tabla número V.1.

El citado Boletín establece además, a partir de la clasificación de los niveles de daños, unas recomendaciones sobre la *urgencia de intervención* o período máximo de tiempo que puede transcurrir entre la detección de los daños y la intervención para su reparación o refuerzo. Estos períodos de tiempo se sugieren en la Tabla número V.2.

T.2		VALORES DE ν (*)				
		CONSTRUCCION	NIVEL DE DAÑOS DE ELEMENTOS DE H.A.			
			A	B	C	D
		Nueva	0,95	0,80	0,60	0,35
		Vieja	0,85	0,70	0,50	0,25

(*)

$$\nu = \frac{\text{Capacidad mecánica}}{\text{Capacidad mecánica inicial}}$$

Tabla V.1

T.3		URGENCIA INTERVENCION	
		ν	Tiempo (Años)
		< 0,5	Inmediata
		> 0,5	1 a 2
		~ 1	10 a 20

Tabla V.2

V.2. VIDA RESIDUAL Y RIESGO DE CORROSION FUTURA

La predicción cuantitativa de la vida útil residual de una estructura es pues una materia sobre la que se tienen muy 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 controlante o «estimador» del daño, aspectos sobre los que todavía existen muy pocos estudios.

Recientemente, el equipo de investigación que trabaja en corrosión de armaduras en el IETCC y en el CENIM ha hecho una propuesta para el cálculo de la vida útil residual de armaduras situadas en estructuras dañadas por corrosión. Esta propuesta se basa en que la evolución del deterioro responderá a las mismas variables que lo han provocado y que éstas permanece-

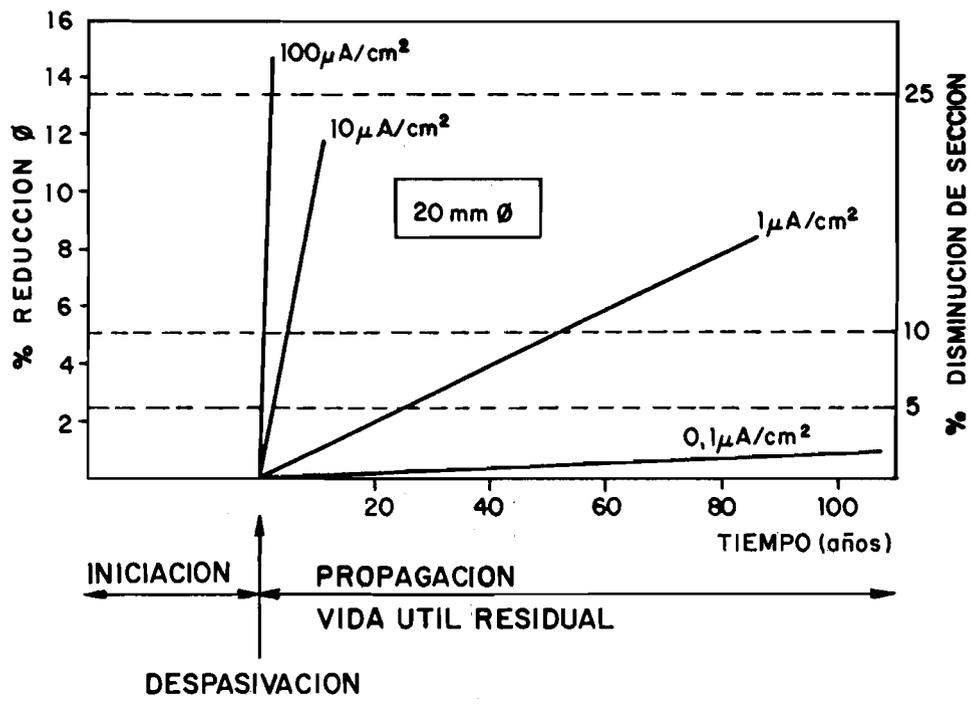
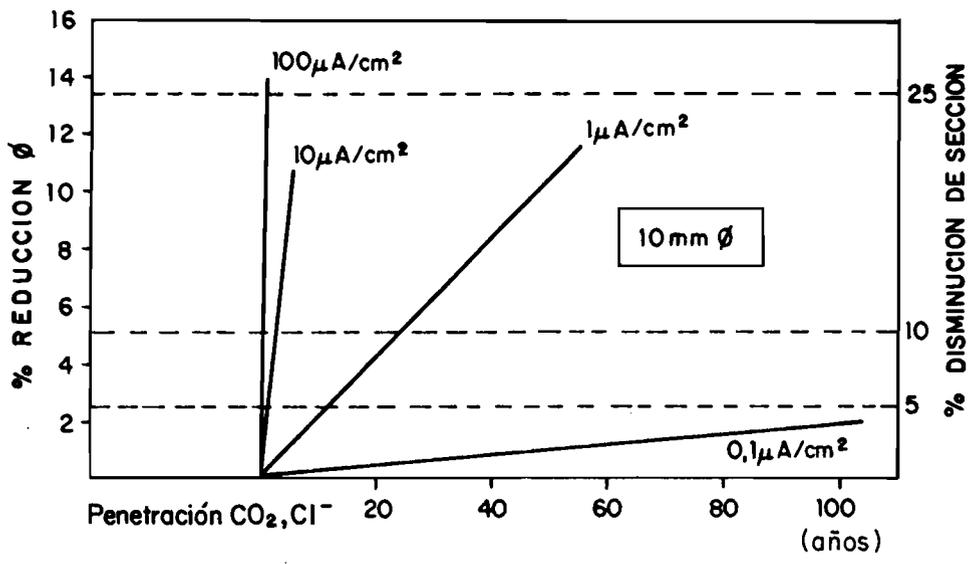


Figura V.1

rán constantes en el futuro. Para ello toman como «estimador» del daño la disminución de la sección del acero y como clasificación de los niveles de daño la ya mencionada que contiene el Boletín 162 del CEB.

Así pues, transformando los valores de intensidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) en penetración del ataque ($\mu\text{m}/\text{año}$) es posible conocer la evolución de la pérdida de sección de los redondos. En la figura V.1. se muestra un ejemplo de las vidas residuales de armaduras de 10 y 20 mm. de diámetro que se conocen a diversas velocidades (medias de un año). Estimada la velocidad de corrosión in-situ, sea directamente o a través de las pérdidas de sección reales encontradas, se podría conocer el número de años que se necesitan para que se alcance una pérdida de sección predeterminada. Conocida la pérdida de sección también pueden hacerse cálculos sobre la disminución de la capacidad resistente del elemento considerado teniendo en cuenta las acciones a las que esté sometido.

Muchos puntos permanecen aun sin respuesta satisfactoria, ya que, por ejemplo, aún se desconoce como influye el grado de corrosión en la pérdida de adherencia o como afectan a ésta las fisuras provocadas por la corrosión. Sólo se conocen cálculos aproximados y deducciones teóricas.

Es importante también tener en cuenta que no siempre que se produce corrosión aparecen fisuras y que cuando éstas aparecen, la seguridad de la estructura puede no estar afectada en absoluto.

No aparecen fisuras en general, cuando el hormigón está constantemente húmedo, ya que entonces el óxido se genera paulatinamente y puede emigrar a través de la red de poros, apareciendo entonces en la superficie del hormigón manchas de óxido, que incluso a veces no están alineadas con las armaduras, pero sí siguen la dirección del movimiento de la humedad en el interior de hormigón. En estos casos puede desaparecer completamente la armadura sin que se haya generado al exterior una sola fisura y el modelo de la figura V.1 es aplicable siempre que la adherencia no se vea afectada.

Las fisuras aparecen siempre que se produzcan ciclos de humedad-sequedad que favorecen la aparición brusca del óxido y su retracción por secado, lo que provoca la aparición de tensiones instantáneas muy elevadas. Cuando las fisuras aparecen es necesario valorar si éstas afectan a la seguridad de la estructura o sólo a su apariencia.

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.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE REPARACION

La elección de un método de reparación particular va a depender de una serie de variables, en las que intervienen factores de posibilidad y acceso a la zona a reparar, factores económicos y factores meramente técnicos. Existe numerosa bibliografía relacionada con la reparación y refuerzo de estructuras, así como una amplia oferta de materiales y sistemas, aunque a pesar de ello la experiencia acumulada no es muy dilatada, y en ocasiones se produce un fallo prematuro de la reparación, que se podría haber evitado con un estudio más cuidadoso. En otras ocasiones este fallo es impredecible, debido a la exigua experiencia de que se dispone sobre el comportamiento de los materiales de reparación a largo plazo.

En el caso de estructuras dañadas por corrosión de armaduras la situación se agrava, ya que el material o sistema de reparación va a tener que actuar en un ambiente y situación que ya se han mostrado especialmente agresivos.

No se va a abordar toda la problemática que supone la reparación de una estructura, ya que ello excede con mucho los objetivos del presente Capítulo. Tampoco se van a tratar aspectos relacionados con el refuerzo. Sólo se pretende dar algunas recomendaciones prácticas relacionadas específicamente con la reparación de obras dañadas por corrosión de armaduras.

Como ya se comentó en el Capítulo I no se puede detener una corrosión de armaduras cuando ya está iniciada, a menos que se le aplique una protección catódica (lo que no siempre resulta técnica y económicamente posible). Todos los demás métodos existentes se basan en una reconstitución del hormigón contaminado y una limpieza o reemplazo de las armaduras afectadas. Los únicos métodos que hasta ahora se han intentado, aunque se desconoce aun su eficacia a largo plazo son: a) en el caso de estructuras carbonatadas, tratar de producir una «realcalinización» del hormigón contaminado, a base de aplicarle superficialmente un mortero muy rico en cemento, que se debe mantener húmedo largo tiempo y b) en el caso de hormigones contaminados con cloruros, se han hecho intentos de extraerlos mediante técnicas electroquímicas, para tratar de descontaminar el hormigón. Esta técnica resulta muy cara y de dudosos efectos a largo plazo.

Por otro lado, aunque las consideraciones sobre seguridad estructural escapan a los objetivos del presente Manual como ya se ha mencionado, es necesario señalar en primer lugar, la importancia de tener en cuenta todas las repercusiones que pueda producir la reparación en la resistencia mecánica de la estructura. Siempre que sea necesario se procederá a su apeo durante la reparación, en sus zonas de mayor riesgo, el cual debe ser objeto de un estudio específico.

Otra consideración básica a tener en cuenta es la compatibilidad entre el nuevo material y el viejo. Así, diferencias de comportamiento frente a cambios de temperatura, transmisión de vapor, deformaciones bajo carga o retracción, puede generar problemas de incompatibilidad que lleven al fallo prematuro de la reparación. Asimismo, se debe tener en cuenta los posibles riesgos de incendio y el previsible comportamiento al fuego del material de reparación, así como si está situado en zonas críticas de la estructura.

Añadir finalmente que en el caso de corrosión de armaduras, es obvio que las fisuras provocadas por este fenómeno no se deben inyectar o sellar sin antes haber eliminado las causas del deterioro.

VI.1. PROCESO DE REPARACION

En el caso de una estructura dañada por corrosión de armaduras, la función básica que debe cumplir una reparación es la de restaurar la protección hacia las armaduras y reconstituir el hormigón y sus propiedades físicas y estéticas.

En general cualquier método de reparación implica o una eliminación del hormigón dañado y su reconstitución, o bien un incremento de la sección de hormigón por un recrecido con el material de reparación, o ambos. La reconstitución o el recrecido, supone que el nuevo material debe ser colocado de una de las tres siguientes maneras: a) a mano, b) usando encofrados o c) mediante proyección o gunitado. La elección de un sistema u otro dependerá tanto del material elegido para la reparación (con base-cemento o base-orgánica) como de la localización y extensión de la zona a reparar.

Otra elección a realizar es si la reparación debe ser extensiva y completa o limitada a las zonas que aparecen dañadas, es decir, si se realiza un «parcheo». En este último caso se deben valorar dos circunstancias que genera esta alternativa: a) los efectos estéticos, ya que excepto que se acuda a una pintura de acabado, la estructura va a tener la apariencia de reparada al ser muy difícil de igualar los colores del hormigón antiguo y el nuevo y b) aunque no aparezcan fisuras o signos de corrosión externa, puede que haya armaduras corroídas en zonas de hormigón aparentemente sano, entonces si se reparan zonas adyacentes y se restaura la protección de una parte de la armadura, éstas pueden empezar a actuar de cátodo frente a las que permanecen corroídas que se pueden deteriorar más deprisa.

VI.1.1. ELIMINACION DEL HORMIGON DAÑADO

La primera acción de una reparación es en general la eliminación del hormigón deteriorado. Esta se debe efectuar hasta encontrar el hormigón sano, teniendo en cuenta que casi todos los métodos usados para eliminar el hormigón pueden provocar una microfisuración superficial, con pequeñas porciones casi sueltas, que es necesario también eliminar para asegurar una buena adherencia con el material de reparación. Asimismo hay que eliminar el hormigón hasta 1 ó 2 cm. por detrás de la armadura corroída, con el fin de permitir un buen acceso para la limpieza del óxido superficial y para que el material de reparación pueda recubrir todo el diámetro de las armaduras rodeándolas en su integridad.

Esta última recomendación es necesario destacarla, ya que dado el elevado costo de eliminación del hormigón, es práctica habitual limpiar la zona dañada sólo hasta que la armadura aparece por su cara exterior, dejando en contacto con el hormigón antiguo la parte posterior de la armadura. Esta circunstancia creará evidentemente una pila diferencial, ya que la parte anterior en contacto con la saneada actuará de cátodo frente a la posterior que podrá empezar a corroerse todavía más deprisa. Así pues, el hormigón es necesario sanearlo hasta descubrir al menos todo el perímetro de la armadura.

VI.1.2. LIMPIEZA DE LAS ARMADURAS

Las armaduras se deberían limpiar del óxido que las recubre antes de proceder a colocar el nuevo material. En general se recurre a un chorreado con arena. Esta operación es especialmente necesaria cuando la corrosión ha sido debida a la presencia del cloruro o cuando el material a utilizar en la reparación sea del tipo resina o polimérico. En este último caso es necesario asegurar una perfecta adherencia, ya que como se comentará más adelante, la protección de estos materiales está basada en su efecto «barrera», por lo que es imprescindible asegurar un perfecto sellado entre armaduras y material de reparación.

Otra práctica habitual es la utilización de una pintura que el fabricante presenta como «antióxido» o similar. Mientras no se tenga una segura experiencia sobre la compatibilidad de estas pinturas con el hormigón o material de reparación, en general es mejor prescindir de ellas y más si se utilizan para evitar una limpieza de las armaduras mediante métodos mecánicos (chorreando, cepillando, etc.). El caso de imprimación de la armadura con resinas es distinto, ya que si estas resinas cubren bien la armadura son realmente una protección adicional contra la corrosión.

Una vez completamente limpias las armaduras deterioradas, si la pérdida de sección es superior al 15 - 25%, se suele recomendar la adición de nuevas armaduras asegurando las longitudes de solape previstas en la Instrucción EH-

para no dañar el hormigón adyacente con las elevadas temperaturas y asegurar una soldadura adecuada, suponiendo naturalmente que se haya comprobado que los aceros existentes y aportados sean aptos para la soldadura. Caso de imprimir las armaduras con resinas, las longitudes de anclaje y solapo deben incrementarse.

VI.1.3. TRATAMIENTO DE LA SUPERFICIE DEL HORMIGON ANTIGUO

Es necesario preparar la superficie del hormigón antiguo para asegurar una perfecta adherencia entre ambos. Esta preparación dependerá en cada caso de diversos factores. Siempre favorece la adherencia una cierta rugosidad superficial. El mojar la superficie del hormigón antiguo o usar resinas de unión dependerá de cada tipo de material de reparación. En ocasiones también se acude para asegurar la adherencia a pasadores metálicos que se incrustan en el hormigón antiguo y lo anclan con el nuevo.

En el caso de un hormigón contaminado por cloruros es muy conveniente acudir siempre al uso de una resina que actúe de barrera contra los cloruros que puede contener el hormigón antiguo. Por diferencia de concentración, estos cloruros tenderán a emigrar hacia el nuevo material de reparación que no los contiene. Es pues muy importante asegurar que estos cloruros no alcanzarán a las armaduras en su emigración hacia el exterior.

VI.2. TIPOS DE MATERIALES DE REPARACION

Los materiales que se pueden colocar a mano o mediante encofrados, son fundamentalmente de dos tipos: a) materiales en base cementicia y b) materiales en base polimérica o de resinas (véase Tabla VI.1).

Entre los primeros los hay cuya base es el cemento portland o bien un cemento expansivo de alto contenido en ettringita. En casi todos los casos contienen diversos aditivos que modifican o mejoran parte de sus propiedades como retracción, exudación, velocidad de fraguado, consistencia, etc.

Los materiales de reparación cuya base es de naturaleza orgánica son muy variados en composición. Los más comunes son los que se basan en resinas epoxi, en resinas de poliéster, de poliuretano, en base acrílica, etc. Algunos de ellos se usan disueltos en el agua de amasado de mortero de cemento dando lugar a materiales mixtos.

En todos los casos estos materiales deben conferir a la armadura una o las dos, de las siguientes características básicas: a) restaurar el medio alcalino que permita la pasivación del acero de las armaduras o b) bien actuar de barrera contra la penetración del oxígeno, la humedad, los cloruros o el dióxido de carbono. En este último caso en que actúan como material barrera, es imprescindible asegurar la perfecta estanqueidad del producto rodeando las armaduras.

Cuando el sistema de reparación que se elige se base en la proyección de un mortero, el material base es siempre cemento ordinario adicionado con algunos aditivos que optimicen el proceso de gunitado y posterior fraguado.

VI.2.1. RECUBRIMIENTOS Y PINTURAS

En relación al uso de recubrimientos y pinturas protectoras la consideración principal que es necesario tener en cuenta cuando se usan en relación a un ataque por corrosión de armaduras, es su permeabilidad al vapor de agua, a los cloruros, al CO_2 y al oxígeno.

Si la pintura se pretende utilizar para evitar el posterior ingreso de agentes agresivos pero sin haber eliminado las causas de la corrosión ya declarada, el uso de pinturas o membranas impermeabilizantes puede incluso agravar el problema. Sólo podría usarse en estas circunstancias si se asegura previamente un secado completo y profundo del hormigón, lo cual es casi imposible en secciones superiores a 15-20 cm. Si el hormigón está contaminado de cloruros o está carbonatado y permanece en su interior una humedad remanente, el proceso de corrosión continuará y en algunas circunstancias (cuando las pinturas sean permeables al vapor de agua) se agravará, ya que el agua penetrará en el hormigón con más facilidad que éste se secará a través de la pintura.

Cuando las películas protectoras se utilicen como acabado después de una reparación, es importante tener en cuenta que las pinturas denominadas «anticarbonatación» no tienen por qué ser impermeables a los cloruros, y que en general casi todas las existentes en el mercado son permeables al vapor de agua, propiedad muy favorable para evitar condensaciones en muros y paredes, pero innecesaria para pintar secciones de hormigón estancas y que no necesiten transpirar. La impermeabilidad al vapor de agua puede ser una propiedad muy necesaria para asegurar la no progresión del deterioro.

VI.3. SEGUIMIENTO DE UNA ESTRUCTURA REPARADA

Una vez efectuada la reparación de una estructura dañada por corrosión de armaduras, si el daño se ha debido al ataque por cloruros resulta muy conveniente un seguimiento de la evolución, ya que, bien sea por penetración de nuevos cloruros o por la progresión de la corrosión en zonas no reparadas, el deterioro puede volver a producirse o continuar.

Este seguimiento se basará en la ejecución de inspecciones visuales periódicas, tomando como referencia las zonas que se hayan detectado como más expuestas o de mayor riesgo. En las estructuras donde sea técnica y económicamente posible se recomienda un control sistemático del potencial de corrosión, cuya evolución a lo largo del tiempo puede ser un indicativo útil del estado de las armaduras.

VI.4. BIBLIOGRAFIA

GUIDE FOR THE USE OF POLYMERS IN CONCRETE - ACI: Journal Sep. (1986) 789.

GUIDE FIP: «Repair and strengthening of reinforced and prestressed concrete structures» - Marzo 1985.

REPAIR OF CONCRETE DAMAGED BY REINFORCEMENT CORROSION: Concrete Soc. Tech. Report no. 26, Oct. 1984.

USE OF EPOXI COMPOUNDS WITH CONCRETE - ACI: 503R-80.

Y. OHAMA: «Polymer-modified mortars and concretes». Concrete Admixtures Handbook, pg. 336-429.

R. B. TILLYER, P. F. LEWIS: «A review of U.K. initiatives in British Standards for polymer concrete testing procedures».

ASTM C-928-80: «Packaged, dry, rapid-hardening cementitious materials for concrete repairs».

DIRECTRICES UEATC PARA LA APRECIACION TECNICA DE LOS REVESTIMIENTOS PLASTICOS DE PARAMENTOS: Monografía n. 339 del I.E.T.c.c. Dic. 1976.

M. FERNANDEZ-CANOVAS: «Las resinas epoxi en la Construcción», ed. I.E.T.c.c. Madrid, 1981.

GUIDE FOR REPAIRS OF CONCRETE BRIDGE SUPERSTRUCTURES: ACI COMMITTEE 546 (1980).

CORROSION PREVENTION FOR CONCRETE AND METAL REINFORCING IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY: Materials Performance - Marzo (1968) 21-28.

GUIDE CHOIX ET APPLICATION DES PRODUITS DE REPARATION DES OUVRAGES EN BETON: Ministere de L'equipment et de l'aménagement du territoire - LCPC - París (1977).

POLYMERS IN CONCRETE: ACI COMMITTEE 548 (1977).

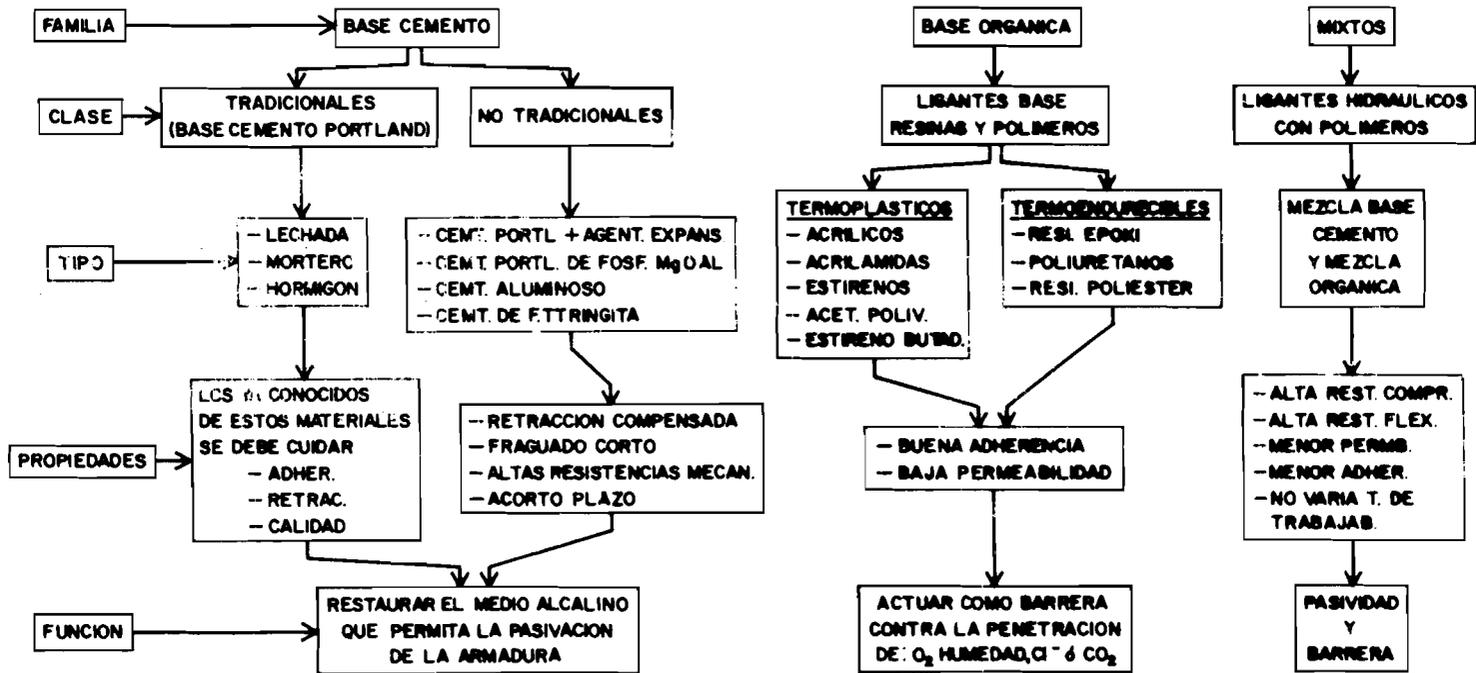


Tabla VI.1

GLOSARIO

A

ACIDO.—Sustancia química que al disolverse en agua da ion hidrógeno. Comparar con **BASE**. Ver **pH**.

ACTIVO.—Estado en que un metal puede corroerse o ser corroído. Califica el potencial de un material que se está corroyendo.

ADITIVO.—Sustancia que se incorpora al hormigón, antes o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario en una proporción no superior al 5% en peso del cemento, con una finalidad concreta.

AIREACION DIFERENCIAL.—Diferente concentración de oxígeno en zonas distintas de un mismo material. Ver **PILA DE AIREACION DIFERENCIAL**.

AGRIETAMIENTO.—Fractura de un material siguiendo una trayectoria única o ramificada o con formación de una red de fisuras finas superficiales.

AGRIETAMIENTO POR CORROSION BAJO TENSIONES.—Ver **CORROSION BAJO TENSIONES**.

ALCALI.—Ver **BASE**.

ANION.—Ion cargado negativamente que migra a través del electrolito hacia el ánodo bajo el efecto de un gradiente de potencial.

ANODO.—Electrodo en el que tiene lugar la reacción de oxidación: los electrones pasan del ánodo al circuito externo. Electrodo donde se produce la corrosión y los iones del metal pasan a la disolución. Metal con tendencia a disolverse o corroerse.

ANODO DE SACRIFICIO.—Metal activo empleado como ánodo en protección catódica. Ver **PROTECCION POR SACRIFICIO**.

ARMADURAS.—Conjunto de barras o cables de acero que se colocan dentro de la masa del hormigón y hacen que el mismo sea apto para resistir esfuerzos de flexión, cizalladura, tracción, etc., o para mejorar su resistencia a la compresión.

B

BARRAS CORRUGADAS.—Barras de acero que presentan relieves en su superficie a fin de mejorar la adherencia del hormigón.

BASE.—Sustancia química que al disolverse en agua da iones hidróxido. Comparar con **ACIDO**. Ver **pH**.

C

CAIDA OHMICA.—Diferencia de potencial entre dos puntos de una resistencia por la que pasa una corriente. Se conoce también como **CAIDA IR**.

CAPILAR DE LUGGIN.—Tubo capilar que contiene electrolito, cuyo extremo está situado junto a la superficie en estudio, empleado para conseguir un contacto iónicamente conductor entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia.

CARBONATACION DEL HORMIGON.—Disminución del pH producida por la reacción de los componentes ácidos del medio (en la atmósfera, dióxido de azufre y dióxido de carbono, principalmente) con la fase líquida intersticial del hormigón, saturada de hidróxido de calcio, y con el cemento en equilibrio con dicha fase líquida.

CATION.—Ion cargado positivamente que migra a través del electrolito hacia el cátodo bajo el efecto de un gradiente de potencial.

CATODO.—Electrodo en el que tiene lugar la reacción de reducción: los electrones pasan al cátodo desde el circuito externo. Por ejemplo, descarga de iones de una disolución, reducción de moléculas de oxígeno, pasando de un estado de oxidación más bajo.

CEMENTO.—Conglomerantes hidráulicos: materiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis y de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua.

CEMENTO CONDUCTOR.—Mezcla altamente conductora que contiene coque y otros materiales, empleado como ánodo de corriente impresa en superficies de hormigón armado.

CENIZAS VOLANTES.—Residuos sólidos recogidos por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales térmicas alimentadas con carbones pulverizados.

CINCAJE.—Ver **GALVANIZACION**.

CLINKER PORTLAND.—Materiales artificiales obtenidos por clinkerización de los correspondientes crudos. Ver **CRUDO DE CLINKER**.

CLINKERIZACION.—Calcinación y sinterización de crudos a la temperatura y durante el tiempo necesarios, y subsiguiente enfriamiento adecuado, a fin de obtener materiales de determinadas composición química y constitución mineralógica. Ver CRUDO DE CLINKER.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.—Capacidad de un material para transmitir la electricidad.

CONDUCTOR ELECTRONICO.—Material en el que la conducción de electricidad se efectúa mediante transporte de electrones.

CONDUCTOR IONICO.—Material en el que la conducción de electricidad se efectúa mediante transporte de iones.

CONGLOMERADOS HIDRAULICOS.—Ver CEMENTO.

CORRIENTE ANODICA.—Corriente debida a una reacción de oxidación. Se considera de signo positivo.

CORRIENTE CATODICA.—Corriente debida a una reacción de reducción. Se considera de signo negativo.

CORRIENTE DE CANJE.—Valor absoluto de las corrientes anódica y catódica de una reacción electródica cuando ha alcanzado el estado de equilibrio dinámico, en el cual la velocidad de la reacción anódica es igual a la de la catódica y, en consecuencia, la corriente de electrodo neta es cero.

CORRIENTE DE ELECTRODO.—Corriente eléctrica originada por la transferencia de electrones en una reacción electródica.

CORRIENTE DE LARGA DISTANCIA.—Corriente que circula por el suelo y retorna a través de estructuras metálicas enterradas.

CORRIENTE DE POLARIZACION.—Corriente de electrodo debida a las reacciones electródicas de un sistema.

CORRIENTE IMPRESA.—Corriente continua suministrada por una fuente externa al sistema electroquímico en una instalación de protección catódica.

CORRIENTE VAGABUNDA.—Corriente que circula por caminos distintos de los circuitos establecidos.

CORROSION.—Ataque de un material por reacción con su medio ambiente, que da lugar al deterioro del material o modificación de sus propiedades.

CORROSION ATMOSFERICA.—Corrosión de un material por especies químicas presentes en la atmósfera, generalmente al aire libre.

CORROSION BIMETALICA.—Corrosión electroquímica de un metal debida al contacto eléctrico con otro metal más noble, situados ambos en un medio corrosivo.

CORROSION ELECTROQUIMICA.—Corrosión que implica reacciones electroquímicas, generalmente en ambientes húmedos.

CORROSION EN FISURAS.—Corrosión localizada en o junto a zonas parcialmente protegidas del medio agresivo, debida a fenómenos de aireación diferencial.

CORROSION FILIFORME.—Corrosión que se produce debajo de ciertos recubrimientos, de manera filiforme y aleatoriamente distribuida.

CORROSION GALVANICA.—Ver **CORROSION BIMETALICA.**

CORROSION GENERAL.—Corrosión uniformemente distribuida sobre la superficie del material, que se desarrolla a una velocidad similar en todos los puntos de dicha superficie.

CORROSION GRAFITICA.—Corrosión selectiva de los constituyentes metálicos del hierro gris dejando el grafito intacto. Llamada también **GRAFITIZACION.**

CORROSION INTERCRISTALINA.—Ver **CORROSION INTERGRANULAR.**

CORROSION INTERDENTRITICA.—Corrosión selectiva que se presenta preferentemente a lo largo de espacios interdentríticos, originada por diferencias en composición química.

CORROSION INTERGRANULAR.—Corrosión selectiva que se presenta en los límites de grano de un metal.

CORROSION INTERNA.—Formación de partículas aisladas de productos de corrosión bajo la superficie de un metal.

CORROSION LOCALIZADA.—Corrosión en determinadas zonas específicas del material.

CORROSION POR CONTACTO.—Ver **CORROSION BIMETALICA.**

CORROSION POR CORRIENTES VAGABUNDAS.—Corrosión inducida por corrientes vagabundas, procedentes de fuentes externas al sistema.

CORROSION POR DEPOSITOS.—Corrosión localizada debajo o alrededor de depósitos de productos de corrosión o de sustancias extrañas al material.

CORROSION QUIMICA.—Corrosión debida a reacciones químicas.

CORROSION SELECTIVA.—Corrosión preferente de determinados componentes o fases de un material.

CORROSION BAJO TENSIONES.—Ataque de un material por la acción simultánea de la corrosión y de tensiones internas o externas, que generalmente da lugar a fisuras y rotura frágil del material.

CORROSION TRANSCRISTALINA.—Ver **CORROSION TRANSGRANULAR.**

CORROSION TRANSGRANULAR.—Corrosión a través de los granos de un material.

CORROSION UNIFORME.—Ver **CORROSION GENERAL**.

CORROSION-FATIGA.—Ataque de un material por la acción simultánea de la corrosión y la fatiga, que da lugar a la fractura.

CORROSIVIDAD.—Tendencia de un medio a producir la corrosión de un material.

CORRUGADO.—Ver **BARRAS CORRUGADAS**.

CRUDO DE CLINKER PORTLAND.—Mezcla homogénea de materiales calizos y arcillosos finamente divididos y convenientemente dosificados, que se clinkerizan mediante un proceso térmico adecuado. Ver **CLINKERIZACION**.

CURADO.—Tratamiento que se da un hormigón, mortero, etc., una vez colocado, consistente en mantener húmeda la superficie para evitar la rápida evaporación del agua.

CURVA DE POLARIZACION.—Representación gráfica de la densidad de corriente de polarización en función del potencial de electrodo para un sistema electroquímico determinado.

D

DENSIDAD DE CORRIENTE.—Intensidad de corriente por unidad de superficie del electrodo.

DEPOSITO.—Sustancia extraña que, procedente del entorno, se deposita sobre la superficie de un material.

DESACTIVACION.—Eliminación de los agentes corrosivos de un medio, por ejemplo, el oxígeno.

DESALEACION.—Corrosión selectiva de uno o más componentes de una aleación.

DESLAMINACION.—Separación del cemento, generalmente en capas, en la interfase cemento-armadura, como consecuencia de la corrosión.

DESPOLARIZACION.—Disminución de la polarización de un electrodo.

DESPOLARIZANTE.—Agente que ocasiona la despolarización.

DIAGRAMA DE EVANS.—Representación gráfica de las curvas de polarización de los procesos anódico y catódico de un sistema de corrosión, tomando la corriente en valor absoluto. El punto de intersección de ambas curvas corresponde al potencial y a la corriente de corrosión.

DIAGRAMA DE POURBAIX.—Representación gráfica del potencial de electrodo en función del pH del medio para un sistema determinado. Muestra las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación de los metales.

DIAGRAMA DE TAFEL.—Representación gráfica del logaritmo del valor absoluto de la corriente en función de la sobretensión para un sistema electroquímico.

DIAGRAMA POTENCIAL-pH.—Ver **DIAGRAMA DE POURBAIX.**

DIAMETRO NOMINAL.—Número convencional que define el círculo de una barra corrugada respecto al cual se establecen las tolerancias.

E

ELECTRODO.—Conductor electrónico (metal) en contacto con un conductor iónico (electrolito): realmente corresponde a regiones delgadas a cada lado de la superficie de separación de ambos conductores.

ELECTRODO AUXILIAR.—Electrodo prácticamente no polarizable empleado en ensayos de polarización para cerrar el circuito con el electrodo de trabajo.

ELECTRODO DE CALOMELANOS.—Electrodo consistente en mercurio en contacto con cloruro de mercurio (I) y disolución de cloruro de potasio de una determinada concentración (0, 1M, 1M, saturada). Ampliamente utilizado como electrodo de referencia en estudios electroquímicos.

ELECTRODO DE COBRE/SULFATO DE COBRE.—Electrodo formado por cobre en contacto con una disolución saturada de sulfato de cobre. Muy utilizado como electrodo de referencia en ensayos de campo de estudios de corrosión.

ELECTRODO DE HIDROGENO (ESTANDAR).—Electrodo constituido por una pieza de platino platinado sumergida en una disolución de ion hidrógeno a actividad igual a la unidad y en equilibrio con hidrógeno gas a la presión de 1 atm.

ELECTRODO DE REFERENCIA.—Electrodo no polarizable, de potencial conocido y reproducible, empleado en las determinaciones del potencial de otros electrodos. Ver **ELECTRODO DE CALOMELANOS**, **ELECTRODO DE COBRE/SULFATO DE COBRE** y **ELECTRODO DE HIDROGENO**.

ELECTRODO DE TRABAJO.—Electrodo donde tiene lugar la reacción que interesa estudiar.

ELECTROLISIS.—Reacción química originada por la aplicación de una corriente eléctrica a un sistema electroquímico.

ELECTROLITO.—Especies químicas, generalmente en disolución o en estado líquido, que constituyen un conductor iónico. (En corrosión de armaduras el electrolito es el hormigón, con el cemento, la humedad y demás productos químicos que contiene.)

ENSAYO ACELERADO.—Ensayo de corrosión realizado bajo condiciones adecuadas para que la velocidad de corrosión aumente, con objeto de obtener resultados en un tiempo breve, inferior al de servicio.

ENSAYO DE CAMPO.—Ensayo de corrosión realizados a campo abierto.

ENSAYO DE CORROSION.—Ensayo para evaluar la resistencia a la corrosión, la efectividad de la protección o la corrosividad de un medio determinado.

ENSAYO DE LABORATORIO.—Ensayo de corrosión llevado a cabo en el laboratorio bajo condiciones preestablecidas.

ENSAYO DE SERVICIO.—Ensayo de corrosión efectuado bajo condiciones de servicio.

ESCORIAS.—Subproductos resultantes de la combinación de las gangas de los minerales metálicos, o del refinado de los metales, con los fundentes y materiales de afino empleados en los distintos procesos metalúrgicos.

ESFUERZO DE TRACCION.—Conjunto de fuerzas normales, iguales y opuestas, que tienden a producir el alargamiento de la pieza o elemento en que actúan.

ESPECIE ELECTROACTIVA.—Especie química que se transforma en una reacción electroquímica.

ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.—Mínima distancia libre entre cualquier punto de la superficie lateral de una barra y el paramento más próximo de la pieza.

ESTADO LIMITE.—Cualquier situación que, al ser alcanzada por una estructura o parte de ella, la pone fuera de servicio, es decir, en condiciones tales que deja de cumplir alguna de las funciones para las que fue proyectada.

ESTADO LIMITE DE UTILIZACION (O DE SERVICIO).—Estado definido por los requisitos funcionales y de durabilidad que debe cumplir la obra en servicio.

ESTRIBO.—Barra de acero situada en un plano perpendicular al de la directriz, que une transversalmente las armaduras longitudinales de un elemento de hormigón armado y que, además de dar rigidez a la armadura, sirve para absorber esfuerzos.

ESTRUCTURA.—Elemento o conjunto de elementos que forman la parte resistente y sustentante de una construcción.

F

FACTOR DE PICADURA.—Relación entre la penetración de la picadura más profunda y la penetración media calculada a partir de la pérdida de peso del material.

FATIGA.—Fenómeno que ocasiona la fractura debido a la aplicación de tensiones, repetidas o fluctuantes, de valores inferiores al de la resistencia o la tracción del material.

FEM.—Valor del potencial de una pila galvánica en circuito abierto cuando la corriente a través del circuito exterior es cero.

FERRALLA.—Conjunto de barras o piezas de acero que sirven especialmente para construir las armaduras del hormigón armado.

FUERZA ELECTROMOTRIZ.—Ver FEM.

G

GALVANIZACION.—Recubrir con cinc. Se utiliza para proteger al acero.

GALVANOSTATO.—Instrumento que mantiene automáticamente una corriente constante entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar.

GRANO.—Cristal de un material, metal o aleación, policristalino, es decir, porción de material en la que los átomos muestran una disposición ordenada.

M

MATERIALES PUZOLANICOS.—Productos naturales o artificiales capaces de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de cementos (portlandita), a la temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos hidráulicos semejantes a los originados en la hidratación de los constituyentes del clinker portland. Ver PUZOLANAS NATURALES.

MEDIO (AMBIENTE).—Entorno o condiciones físicas y químicas de un material o sistema.

METAL ACTIVO.—Metal que se está corroyendo o en condiciones de corroerse.

METAL NOBLE.—Metal resistente a los reactivos químicos. Su potencial es muy positivo con relación al electrodo de hidrógeno. Suelen hallarse en la naturaleza en estado elemental.

METALIZACION.—Proceso de recubrimiento de un material con una capa de metal.

N

NOBLE.—Estado en que un metal no tiende a corroerse. Califica la dirección positiva del potencial de electrodo.

O

OXIDACION.—Pérdida de electrones de una especie en una reacción. En un sistema electroquímico tienen lugar en el ánodo. Comparar con REDUCION.

OXIDACION ANODICA.—Ver OXIDACION.

OXIDACION INTERNA.—Ver CORROSION INTERNA.

P

PAR GALVANICO.—Sistema formado por dos conductores electrónicos diferentes, generalmente metales, en contacto y situados en un electrolito, que pueden dar lugar a una pila de corrosión.

PAR METALICO.—Ver PAR GALVANICO.

PASIVO.—Estado de la superficie de un metal resultante de su pasivación. Cuando actúa como ánodo el metal está caracterizado por una alta polarización.

PASIVACION.—Disminución de la velocidad de oxidación de un metal, debido frecuentemente a la formación de una capa de productos de oxidación sobre el metal.

PASIVANTE.—Agente que produce la pasivación. Varía el potencial de un metal hacia valores más positivos (nobles).

PASIVIDAD.—Ver PASIVO.

PATINA.—Recubrimiento que se forma sobre la superficie de un metal al reaccionar con el medio ambiente.

PELICULA.—Capa fina, que puede ser visible o invisible.

PELICULA PROTECTORA DE CUBRICION.—Recubrimiento de un metal por reacción con un medio adecuado, con fines protección o embellecimiento.

PENDIENTE DE TAFEL.—Pendiente de la línea de Tafel. Ver DIAGRAMA DE TAFEL.

pH.—Logaritmo decimal del inverso de la actividad del ion hidrógeno en una disolución (en general, la actividad se reemplaza por la concentración). Indica la acidez o la basicidad de una disolución; a 25 °C, el pH de una disolución acuosa neutra es 7, en disolución ácida es menor y en disolución básica es mayor.

PICADURA.—Corrosión localizada en puntos o pequeñas zonas de la superficie de un metal que da lugar a cavidades muy profundas.

PILA.—Ver PILA GALVANICA.

PILA ACTIVA-PASIVA.—Pila constituida por un metal con una zona en estado activo (ánodo) y una zona en estado pasivo (cátodo).

PILA DE AIREACION DIFERENCIAL.—Pila de concentración de oxígeno.

PILA DE CONCENTRACION.—Pila galvánica constituida por dos electrodos iguales con componentes a concentraciones diferentes. Esta diferencia origina la formación de las zonas anódica y catódica.

PILA DE CORROSION.—Pila galvánica que da lugar a corrosión. Ver **PILA LOCAL**.

PILA GALVANICA.—Sistema electroquímico formado por dos electrodos en contacto mediante un conductor iónico que, al ser cortocircuitados exteriormente con un conductor electrónico, produce energía eléctrica, debido a las reacciones electrónicas que tienen lugar. El electrodo donde se produce la reacción de oxidación constituye el ánodo y el electrodo donde se produce la reacción de reducción se conoce como cátodo.

PILA LOCAL.—Pila galvánica debida a las heterogeneidades entre zonas distintas de la superficie de un mismo metal en presencia de un electrolito, que dan lugar a las zonas anódica y catódica.

POLARIZACION.—Variación del valor del potencial de un electrodo debido al paso de corriente, a consecuencia de efectos tales como transferencia de carga, transporte, reacción química, etc. El potencial de un ánodo se desplaza hacia valores más positivos (más noble) y el de un cátodo hacia más negativos (más activo). Si esta variación es muy pequeña se dice que el electrodo es no polarizable.

POLARIZACION ANODICA.—Polarización del ánodo. Ver **POLARIZACION**.

POLARIZACION CATODICA.—Polarización del cátodo. Ver **POLARIZACION**.

POLARIZACION DE CONCENTRACION.—Polarización originada por cambios de concentración de especie electroactiva, debidos a fenómenos de transporte, reacciones químicas, etc. Ver **POLARIZACION**.

POROSIDAD.—Relación, expresada en tanto por ciento, entre el volumen de poros del hormigón y el volumen del mismo.

PORTLAND.—Ver **CLINKER PORTLAND**.

POTENCIAL ACTIVO.—Ver **POTENCIAL DE CORROSION**.

POTENCIAL ANODICO.—Ver **POTENCIAL ELECTRONEGATIVO**.

POTENCIAL CATODICO.—Ver **POTENCIAL ELECTROPOSITIVO**.

POTENCIAL DE ELECTRODO.—Potencial de un electrodo en una disolu-

ción medido respecto a un electrodo de referencia, sin caída óhmica alguna.

POTENCIAL DE EQUILIBRIO.—Potencial de un electrodo en una disolución en estado de equilibrio.

POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO.—Potencial de una pila sin paso de corriente por el circuito externo.

POTENCIAL DE CORROSION.—Potencial de un metal en un medio corrosivo, medido en circuito abierto, respecto a un electrodo de referencia.

POTENCIAL DE DESCOMPOSICION.—Potencial necesario para producir la descomposición de una especie mediante una reacción electródica.

POTENCIAL DE PROTECCION.—Valor límite del potencial a partir del cual disminuye sensiblemente la velocidad de corrosión.

POTENCIAL ELECTRONEGATIVO.—Potencial más negativo que el del hidrógeno en la serie de fuerzas electromotrices.

POTENCIAL ELECTROPOSITIVO.—Potencial más positivo que el del hidrógeno en la serie de fuerzas electromotrices.

POTENCIAL ESTANDAR (DE ELECTRODO).—Valor de la FEM de una pila formada por el electrodo de hidrógeno estándar y el electrodo considerado con las especies a actividad unidad.

POTENCIAL MIXTO.—Potencial de un sistema electródico cuando las contribuciones de las corrientes anódicas y catódicas se deben a dos o más reacciones electroquímicas y la corriente total es igual a cero.

POTENCIAL NOBLE.—Potencial más catódico que el potencial estándar del hidrógeno.

• **POTENCIOSTATO.**—Instrumento para mantener automáticamente un electrodo a potencial constante respecto de un electrodo de referencia.

POTENCIOSTATICO.—Relativo a potencial constante.

PROTECCION ANODICA.—Disminución de la corrosión por desplazamiento del potencial de corrosión hacia los valores más positivos, mediante una corriente anódica o un agente oxidante, y consiguiente pasivación de la superficie del metal.

PROTECCION CATODICA.—Disminución de la velocidad de corrosión obtenida desplazando el potencial de corrosión hacia valores menos oxidantes (más catódicos), mediante el acoplamiento de un ánodo de sacrificio o la aplicación de una corriente catódica.

PROTECCION POR SACRIFICIO.—Disminución de la corrosión de un metal por acoplamiento con otro metal más anódico. Es una forma de protección catódica. Ver ANODO DE SACRIFICIO.

PUZOLANAS NATURALES.—Principalmente rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza traquítica alcalina o pumítica. También las harinas fósiles de naturaleza silícica, como la diatomita.

R

REACCION ELECTRODICA.—Reacción electroquímica que tiene lugar en el electrodo.

REACCION ELECTROQUIMICA.—Reacción química acompañada de consumo o producción de energía eléctrica.

REACCION QUIMICA.—Transformación de unas especies químicas determinadas, llamadas reaccionantes, en otras especies químicas diferentes, llamadas productos.

RECUBRIMIENTO CONDUCTOR.—Material altamente conductor, tipo mastique, empleado como ánodo de corriente impresa en superficies de hormigón armado.

REDUCCION.—Ganancia de electrones de una especie en una reacción. En un sistema electroquímico tiene lugar en el cátodo. Comparar con **OXIDACION**.

RENDIMIENTO DE LA CORROSION DEL ANODO.—Relación entre pérdida de peso real de un ánodo y la calculada a partir de la cantidad de electricidad implicada.

RESISTENCIA MECANICA (DE UN HORMIGON).—Tensión a la cual se produce la rotura del hormigón.

S

SEMIPILA.—Sistema formado por un metal en contacto con una disolución de sus iones. Entre el metal y la disolución se establece una diferencia de potencial, y la unión de dos semipilas da lugar a una pila galvánica.

SERIE ELECTROMOTRIZ.—Relación de especies químicas ordenadas según el valor de los potenciales estándar.

SERIE GALVANICA.—Relación de metales y aleaciones ordenados según el valor de los potenciales de corrosión en un medio determindio.

SOBRETENSION.—Diferencia entre los valores del potencial de un electrodo por el que pasa una corriente dada y de su potencial de equilibrio. Ver **POLARIZACION**.

SOLICITACION.—Conjunto de esfuerzos que actúan sobre un elemento.

T

TABLERO DE PUENTE.—Estructura plana de un puente sobre la cual se ha colocado el pavimento transitable y que descansa sobre la estructura aérea de los arcos, jacentas, etc., dispuestos a su largo.

TUBERCULACION.—Corrosión localizada en la que los productos de corrosión formados presentan aspecto tuberculiforme.

V

VELOCIDAD DE CORROSION.—Valor medido del efecto de la corrosión por unidad de tiempo y de superficie. Generalmente se expresa como pérdida de peso por unidad de superficie y tiempo o penetración por unidad de tiempo.

VIGA.—Pieza de hormigón armado mucho más larga que ancha destinada a trabajos principalmente de flexión.

Z

ZONA ACTIVA.—Zona de la curva de polarización donde se oxida el metal.

ZONA PASIVA.—Zona de la curva de polarización desde donde la intensidad de corriente es prácticamente despreciable.

ZONA TRANSPASIVA.—Zona de la curva de polarización, más anódica que el potencial de pasivación, donde la intensidad de corriente aumenta significativamente.

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	Antonio de la Fuente Sánchez
LABORATORIO	de Barcelona de la Direcció General d'Arquitectura i Habitatge
TIPO DE OBRA	Viviendas
FECHA CONSTRUCCION	
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Baranda de hormigón de los balcones
UBICACION	Barcelona
ORIENTACION	
AMBIENTE	Aire libre

FECHA INSPECCION	Mayo de 1984
TIPO DE INSPECCION	Visual y toma de muestras
SINTOMAS DE DETERIORO	Fisuración de barandas de hormigón y oxidación de las armaduras
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Determinación de compuestos de azufre y cloruros SO ₃ = 0,40% Cl ⁻ = 0,35%
DIAGNOSTICO	Corrosión de las armaduras causadas por los cloruros
RECOMENDACIONES	
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
----------------------	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	Antonio de la Fuente Sánchez
LABORATORIO	de Barcelona de la Direcció General d'Arquitectura i Habitatge

TIPO DE OBRA	
FECHA CONSTRUCCION	
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	
UBICACION	
ORIENTACION	
AMBIENTE	

FECHA INSPECCION	
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Una muestra de pilares de hormigón armado en la que los aceros estaban intensamente corroidos
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Compuestos de azufre 0,74% de SO ₃ Cloruros 0,81% de Cl ⁻
DIAGNOSTICO	La corrosión era debida al alto contenido en Cl ⁻ La cantidad de SO ₃ podría causar problemas expansivos adicionales en el hormigón
RECOMENDACIONES	
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	Antonio de la Fuente Sánchez
LABORATORIO	de Barcelona de la Direcció General d'Arquitectura i Habitatge
TIPO DE OBRA	Nave industrial
FECHA CONSTRUCCION	Aproximadamente 1967
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	
UBICACION	Provincia de Lérida
ORIENTACION	
AMBIENTE	Seco y frio

FECHA INSPECCION	1985
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Interesa corrosión de las armaduras de las viguetas
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Compuestos de azufre 0,45% SO ₃ Cloruros 0,57% de Cl ⁻
DIAGNOSTICO	Durante toda su vida útil la nave estaba dedicada a almacén seis meses antes de presentarse la corrosión se reconvirtió en un gallinero industrial con lo que se produjo un aumento importante de la humedad y la temperatura que a nuestro juicio fue el factor desencadenante de la corrosión de las viguetas que habían sido fabricadas con acidón de Cl ₂ Ca
RECOMENDACIONES	
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
---------------	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	José Eduardo Domínguez
LABORATORIO	Edificación. Las Palmas G. C.
TIPO DE OBRA	Edificio Apartamentos
FECHA CONSTRUCCION	Aproximad. 1970
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Pilares, vigas y forjado de semivigueta
UBICACION	Playa del Inglés. G. C.
ORIENTACION	
AMBIENTE	Marino

FECHA INSPECCION	Julio 1985
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Pilares: daños localizados en esquinas, con fisuras y desprendimiento de hormigón de recubrimiento
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Capa carbonatación (2-3 cm) Análisis químico agua de riego y piscina Cemento supuestamente utilizado: "Atlante", 25% puzolana
DIAGNOSTICO	<ul style="list-style-type: none"> - Espesor recubrimiento insuficiente, sobre todo en estribos (1 cm) - Presencia cloruros por atmósfera marina, evaporación agua piscina y capilaridad agua de riego - Corrosión por carbonatación hormigón en atmósfera marina
RECOMENDACIONES	
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
---------------	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	José Eduardo Domínguez
LABORATORIO	Edificación. Las Palmas G. C.
TIPO DE OBRA	Hotel
FECHA CONSTRUCCION	Aproximad. 1965
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Pilares y vigas
UBICACION	Jandía (Fuerteventura)
ORIENTACION	
AMBIENTE	Marino

FECHA INSPECCION	Septiembre 1986
TIPO DE INSPECCION	Visual (parcial) y laboratorio
SINTOMAS DE DETERIORO	Corrosión localizada de armaduras de montaje en semivigueta, bajo cubierta plana visitable, con jardineras Forjado cubierto con falso techo
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Análisis químico agua consumo Sobre muestra de vigueta: hormigón de relleno hormigón de zapata
DIAGNOSTICO	<ul style="list-style-type: none"> - Carbonatación atm. marina - Ciclos humedad/secado provocados por fugas agua de riego - Cloruros detectados en el hormigón de relleno
RECOMENDACIONES	
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
---------------	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	Juan José Alvarez Colomer
LABORATORIO	Laboratorio Calidad Edificación - Santa Cruz de Tenerife
TIPO DE OBRA	Grupo de 20 Viviendas Sociales de Promoción Pública
FECHA CONSTRUCCION	1961-1962
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Estructura de muros de carga soportando forjados de viguetas y bovedillas
UBICACION	Norte de Tenerife
ORIENTACION	Los dos bloques se agrupan linealmente de Este a Oeste
AMBIENTE	Rural. Norte sometido a los Alisios. Humedad relativa 60/70%

FECHA INSPECCION	Febrero de 1986
TIPO DE INSPECCION	Visual en obra (prueba de la fenolftaleina). En Laboratorio
SINTOMAS DE DETERIORO	Daños estructurales. Viviendas con síntomas de corrosión de armaduras, grietas y humedades generalizadas.
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Análisis en hormigón de vigueta más afectada: Escasa reserva alcalina, carbonatación; porosidad en torno al 22%; cloruros (0,16%) El análisis químico indica posible mezcla de C. Aluminosos y Portland Difracción de R. X confirma C. Aluminoso
DIAGNOSTICO	En el grupo se ha producido un deterioro de hormigón y armaduras debido a la utilización de C. Aluminoso, condiciones ambientales (calor y humedad), ataque de aguas fecales (agresivas) y/o cloruros.
RECOMENDACIONES	Estado de ruina inminente. La reparación no es posible con medios normales. Se recomienda el desalojo del Grupo y su posterior derribo
REPARACION REALIZADA Y COSTE	No se efectuó reparación alguna. Se derribó el Grupo y se construirá uno nuevo

<p style="text-align: center; margin: 0;">OBSERVACIONES</p> <p style="margin: 5px 0;">Diagnóstico y recomendaciones recogidos del INFORME realizado por el Arquitecto encargado por el Gobierno Autónomo</p>	
---	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	
LABORATORIO	IETCC
TIPO DE OBRA	Esclusas para atraque de barcos
FECHA CONSTRUCCION	
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Muros de hormigón armado en contacto con agua dulce
UBICACION	Andalucía
ORIENTACION	
AMBIENTE	Húmedo y cálido

FECHA INSPECCION	
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Erosión superficial del hormigón y delaminaciones debidas a corrosión de armaduras
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Cloruros - 0,0 - 0,03% en peso de hormigón Sulfatos - 0,20 - 0,30% Rayos X - ausencia de $Ca(OH)_2$ y presencia de $CaCO_3$ muy poca ettringita
DIAGNOSTICO	Corrosión por erosión del agua y deslavado
RECOMENDACIONES	Saneado del hormigón y reconstrucción con otro de galvanometría muy estudiada, denso y resistente al choque
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
---------------	---

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	
LABORATORIO	IETCC
TIPO DE OBRA	Postes de conducción de electricidad
FECHA CONSTRUCCION	1982
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Postes de hormigón armado muy esbeltos para el transporte de electricidad
UBICACION	En una isla mediterránea
ORIENTACION	
AMBIENTE	Muy húmedo y cálido con vientos del Noroeste

FECHA INSPECCION	1987
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Grietas longitudinales en las esquinas y delaminaciones
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Porosidad - 5,9 - 8,2% Cloruros - 0,06 - 0,12% en peso de muestra
DIAGNOSTICO	Corrosión por contaminación de cloruros y el ambiente cálido y húmedo (niebla salina). Presencia de fisuras debidas al viento
RECOMENDACIONES	<ul style="list-style-type: none"> - Recubrimientos superficiales del hormigón ó - Galvanizado de armaduras ó - Inhibidores de corrosión ó - Protección catódica
REPARACION REALIZADA Y COSTE	

OBSERVACIONES	
---------------	--

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	
LABORATORIO	IETCC
TIPO DE OBRA	Nave de planta
FECHA CONSTRUCCION	1975
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Nave que contiene planta en celulosas electroquímicas que contienen salmuera, sosa, gas cloro y mercurio
UBICACION	
ORIENTACION	
AMBIENTE	De agresividad por sustancias químicas
FECHA INSPECCION	1987
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Tanto las partes de la estructura en hormigón como las metálicas presentan importantes manchas de óxido, grietas y delaminaciones. Las armaduras se muestran muy corroídas con estribos rotos
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Cloruros - entre 0,67% y 3,6% en peso de hormigón
DIAGNOSTICO	Corrosión muy notable debido al medio altamente agresivo para el hormigón y las armaduras
RECOMENDACIONES	Sanear el hormigón, limpieza de armaduras, reconstrucción y dar un acabado resistente a los medios muy básicos y ácidos e impermeable a los cloruros
REPARACION REALIZADA Y COSTE	
OBSERVACIONES	

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	
LABORATORIO	IETCC
TIPO DE OBRA	Pórticos en hormigón armado
FECHA CONSTRUCCION	1958
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Torre de soporte de instalaciones de distribución de materias primas en planta química
UBICACION	Asturias
ORIENTACION	
AMBIENTE	Muy contaminado de gases de combustión
FECHA INSPECCION	1987
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Se detectan numerosas grietas longitudinales a lo largo de todas las columnas, con delaminaciones en muchos puntos
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Cloruros - 0,19% - 0,43% en peso de hormigón Sulfatos - 1,4 - 2,5% Fenolftaleína - carbonatación en muchas zonas
DIAGNOSTICO	Corrosión de armaduras por contaminación de cloruros y carbonatación, debidas al ambiente muy altamente contaminado
RECOMENDACIONES	- Reparar la estructura o construir una nueva en paralelo a la existente
REPARACION REALIZADA Y COSTE	- Se construyó una nueva torre de distribución metálica

OBSERVACIONES	
---------------	---

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF. <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>
---	--

REMITENTE	C. Andrade
LABORATORIO	IETCC
TIPO DE OBRA	Pantalán de atraque barcos de recreo
FECHA CONSTRUCCION	1977
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Vigas pretensadas prefabricadas de 17 m de luz apoyadas sobre muros de hormigón y con una losa continua fabricada in situ
UBICACION	Ambiente marino - distancia de agua 30 cm
ORIENTACION	
AMBIENTE	Cálido
FECHA INSPECCION	1983
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	El ala inferior de las vigas presentaba grietas longitudinales y se había perdido completamente el hormigón y estaban rotos y corroídos casi todos los cables y alambres pretensados, cerquillos también corroídos
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Cloruros - media de 1,15% peso hormigón Porosidad - 16% Recubrimiento armaduras: de 1 a 10 mm
DIAGNOSTICO	Corrosión muy avanzada debida a entrada de cloruros por falta de espesor de recubrimiento. El hormigón ha desaparecido al haber gran concentración de cables finos, siendo completamente inapropiado
RECOMENDACIONES	Demolición o refuerzo de la actual estructura
REPARACION REALIZADA Y COSTE	Construcción de vigas de hormigón armado colocadas en los huecos dejados por las vigas pretensadas
OBSERVACIONES	

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS	REF.
---	---

REMITENTE	
LABORATORIO	
TIPO DE OBRA	Depósito de agua
FECHA CONSTRUCCION	1945
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Muros y cubierta de hormigón armado con armadura desigualmente repartida
UBICACION	Semienterrado
ORIENTACION	
AMBIENTE	Interior de muy elevada humedad
FECHA INSPECCION	Julio 1984
TIPO DE INSPECCION	
SINTOMAS DE DETERIORO	Delaminación superficial del hormigón interior con armaduras oxidadas a la vista. Desaparición total de armaduras por corrosión. Manchas de óxido ambientales
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Inspección visual Cloruros - no había Porosidad - 6% en volumen Profundidad carbonatación
DIAGNOSTICO	Corrosión por deslavado de hormigón. La neutralización progresó 2-4 cm. Corrosión de las armaduras situadas cercanas a la superficie por pérdida de alcalinidad del hormigón
RECOMENDACIONES	Picado hasta encontrar zona sana y reconstrucción del hormigón y las armaduras. En las zonas de no gran corrosión se recomendó un recrecido superficial con un mortero u hormigón rico en cemento
REPARACION REALIZADA Y COSTE	
OBSERVACIONES	

FICHAS DE CORROSION DE ARMADURAS

REF.

REMITENTE	
LABORATORIO	
TIPO DE OBRA	Edificio oficinas
FECHA CONSTRUCCION	1952-54 - Paralización y terminación en 1961-65
TIPO DE ESTRUCTURA (ANTECEDENTES)	Pilares y jácenas de hormigón armado
UBICACION	Muy cercano al mar
ORIENTACION	
AMBIENTE	Cálido todo el año, elevada humedad
FECHA INSPECCION	1984
TIPO DE INSPECCION	Detallada
SINTOMAS DE DETERIORO	En los pilares grietas longitudinales paralelas a las armaduras. Armaduras muy corroídas. Los forjados están en general bien, excepto en la planta baja. Las vigas están escasamente deterioradas. La fachada presenta descascarillados y ha sido reparada varias veces
ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS	Porosidad - 17% corrosión 100 / año disminución máxima de Ø Dosificación - 620 kg cemento/m ³ (puzolanas) Cloruros - media de 0,25 Carbonatación - algunas muestras estaban muy carbonatadas
DIAGNOSTICO	Mala calidad del hormigón apreciada a simple vista y elevada porosidad. Falta de fines en los áridos. Escaso recubrimiento de las armaduras. Corrosión debida a la entrada de cloruros, agravada por el clima y el tiempo que permaneció la estructura a la intemperie
RECOMENDACIONES	Saneamiento del hormigón y limpieza de la armadura y reconstrucción de todos los elementos
REPARACION REALIZADA Y COSTE	
OBSERVACIONES	