



U.M.S.N.H

Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO.

"Tesis"
que para obtener el título de:
Ingeniero Civil

Presenta:

Emmanuel Alejandro Martínez Hernández

Asesor de Tesis:
Dr. JOSE CARLOS RUBIO AVALOS

MORELIA MICHOACAN, MAYO 2008



Agradecimientos.

A DIOS; por permitirme después de varios años de mi vida de navegar en el mar de las ideas y de darme una fuerza inmensa para sobreponerme a las adversidades de Él y por que después de navegar tanto tiempo a la deriva hoy me has permitido llegar a tierra firme de nuevo.

A mi Madre; **Emilia Hernández Perdomo**, con un cariño, amor y respeto inmensos, para ti por ser tan maravillosa y extraordinaria y que Dios me dio la dicha de que seas mi madre: para Ti Mama. Por motivarme a hacer las cosas bien día con día, hoy te entrego uno de mis sueños y anhelos hechos realidad.

“Gracias Mama T.Q.M.”

A mi Padre; **Oscar Martínez Torres**, por hacerme de mi una persona de bien y por trasmitirme tus conocimientos y consejos que a lo largo de la vida has adquirido y por inculcar en mi los valores que harán de mi una persona de éxito como son: Fortaleza, Confianza, Respeto, etc.

“Gracias Papa T.Q.M.”

A mis Hermanos; **Ana Magdalena Martínez Hernández e Iván Martínez Hernández**, por que siempre los he sentido a mi lado y por ser un motor en mi vida para salir adelante.

“Gracia los Quiero Mucho”

A mi Asesor, **Dr. José Carlos Rubio Avalos**, a quien deseo expresar mi mayor agradecimiento por su constante preocupación, estímulo y apoyo personal brindado para la culminación de este trabajo.

Igualmente quiero expresar un enorme agradecimiento a la **U.M.S.N.H** y en especial a la **Facultad de Ingeniería Civil** por haber inculcado en Mí de parte de todo su personal docente el conocimiento y los valores para ejercer de una manera ética y profesional esta carrera.

Resumen.

El gran desarrollo de la construcción en los últimos 50 años se ha basado principalmente en la utilización del Concreto Reforzado con Acero, el cual debido a sus propiedades de durabilidad y rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista de este sector que es la construcción, siendo utilizado tanto en edificaciones como para obra pública. La combinación del concreto y el acero ofrece además como sabemos magníficas prestaciones en cuanto a resistencias mecánicas y manejabilidad.

Hace algunos años se pensaba que un concreto Reforzado con Acero bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo físico, químico o mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezcan todo tipo de patologías asociadas.

El principal problema del Concreto Reforzado con Acero es la Corrosión del acero embebido en él, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones y siendo causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras.

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

Por tanto, esta tesis, producto de una Investigación Teórica esta relacionada con este problema de suma importancia en el sector de la Construcción que es la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado con Acero; su objetivo primordial fue realizar una recopilación de los Fundamentos Generales de la Corrosión como; qué es la corrosión, causas de iniciación de la corrosión, tipos de corrosión existentes, factores que afectan y desencadenan la corrosión del acero de refuerzo, los métodos de protección control y prevención de la corrosión más utilizados en la actualidad. Todo esto para dar paso seguido a una correcta metodología de Evaluación y Diagnóstico de la Corrosión en las estructuras de concreto Reforzado con Acero, teniendo como contrapartidas esta el uso de adecuados Procedimientos de Inspección y de la realización de adecuados Métodos de Ensayos, para así llegar a una buena Evaluación y Diagnóstico correctos de las Estructuras afectadas por este fenómeno, para saber posteriormente, dar la mejor solución a una reparación o rehabilitación de las estructuras afectadas por la Corrosión.

ÍNDICE.

RESUMEN.	1
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. GENERALIDADES.	1
1.2. COMPONENTES DE LOS CEMENTOS.	4
1.3. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS.	6
1.4. DURABILIDAD DEL CONCRETO REFORZADO.	8
1.4.1. ATAQUE POR AGENTES QUÍMICOS.	9
1.4.2. ATAQUE POS AGENTES FÍSICOS.	11
1.4.3. ATAQUE POR AGENTE BIOLÓGICOS.	11
2. ESTADO DEL ARTE.	12
2.1. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN.	12
2.1.1. CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO.	13
2.1.2. TIPOS DE CORROSIÓN.	17
2.1.2.1. Corrosión Generalizada o Uniforme.	18
a. Atmosférica.	18
b. Corrosión Galvánica.	18
2.1.2.2. Corrosión Localizada.	19
a. Corrosión por Picaduras o "Pitting".	19
b. Corrosión en Espacios Confinados.	19
c. Corrosión bajo Tensión.	20
d. Corrosión por Corrientes de Interferencia.	20
2.1.2.3. Corrosión microbiológica (MIC)	21
2.1.2.4. Corrosión electroquímica o polarizada.	21

2.1.3.	FACTORES QUE AFECTAN, DESENCADENAN Y ACELERAN LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS.	22
2.1.3.1.	Dosificación del Concreto.	23
2.1.3.2.	Compacidad y Homogeneidad.	24
2.1.3.3.	Espesor y Recubrimiento del Concreto.	25
2.1.3.4.	Humedad Ambiental.	26
2.1.3.5.	Efecto del Oxígeno.	28
2.1.3.6.	Efecto de la Temperatura.	29
2.1.3.7.	Estado Superficial del Acero.	29
2.1.3.8.	Tensiones Mecánicas del Acero.	29
2.1.3.9.	Corrientes Erráticas de Interferencia.	30
2.1.3.10.	Contacto Galvanico entre dos Metales.	30
2.1.3.11.	Iones Despasivantes.	31
	a. Cloruros.	31
	b. Sulfatos.	34
2.1.3.12.	Carbonatación.	35
2.1.3.13.	Lixiviación por Aguas Blandas.	37
2.1.3.14.	Presencia de Coqueas en Contacto con Armaduras.	38
2.1.3.15.	Existencia de Fisuras.	38
2.1.4.	EFFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.	40
2.1.5.	MÉTODOS DE PROTECCIÓN, CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN.	41
2.1.5.1.	Elección del material.	43
2.1.5.2.	Concepción de la pieza.	43
2.1.5.3.	Dominio del ambiente.	43
2.1.5.4.	Aislamiento del medio.	44
2.1.5.5.	Galvanoplastia.	44
2.1.5.6.	Exposición a soluciones reductoras.	44
2.1.5.7.	Morteros de Reparación.	44
2.1.5.8.	Revestimientos.	45
2.1.5.9.	Extracción de los Iones Cloruros.	46
2.1.5.10.	Realcalinización.	46
2.1.5.11.	Protección contra la Corrosión en Medios Agresivos.	46
	a. Protección Catódica.	46
	b. Galvanización de las Armaduras.	48
	c. Recubrimientos con Resinas Epoxi.	48
	d. Inhibidores de Corrosión.	54
	e. Recubrimientos sobre el Concreto.	62
	f. Otros Métodos de Protección.	62
2.1.6.	PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA.	63
2.1.7.	VIDA RESIDUAL DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO.	65

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.	66
3.1. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN.	66
3.1.1. GENERALIDADES	66
3.1.2. INSPECCION PRELIMINAR.	68
3.1.2.1. Elaboración de una Ficha de Antecedentes de la Estructura y del Medio.	69
a. Estructura.	69
b. Medio.	71
3.1.2.2. Examen Visual General de la Estructura.	72
3.1.3. INSPECCION DETALLADA.	76
3.1.3.1. Plan de Trabajo.	76
3.1.3.1.1. Elaboración del Plan de Muestreo.	77
3.1.3.1.2. Selección de Técnicas y Zonas de Ensayo/Mediciones/Análisis.	78
3.1.3.1.3. Planificación de Materiales y Equipamiento.	78
3.1.3.2. Ejecución de la Inspección Detallada.	78
3.1.3.2.1. Ensayos a realizar en una Inspección Detallada.	79
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS.	80
3.2.1. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL CONCRETO.	80
3.2.1.1. Toma de Testigos.	80
3.2.1.1.1. Núcleos.	81
3.2.1.1.2. Porciones de Material en Polvo.	81
3.2.1.1.3. Porciones de Concreto.	82
3.2.1.2. Resistividad Eléctrica.	82
3.2.1.2.1. Objetivo.	82
3.2.1.2.2. Definiciones.	83
3.2.1.2.3. Materiales y Equipos.	83
3.2.1.2.4. Procedimiento.	83
a. Para ensayos a nivel de Laboratorio.	85
b. Para Ensayos "in situ".	85
3.2.1.2.5. Criterios de Evaluación.	87
3.2.1.2.6. Observaciones.	87

3.2.1.3.	Ultrasonido.	87
3.2.1.3.1.	Objetivo.	87
3.2.1.3.2.	Definiciones.	87
3.2.1.3.3.	Equipos y Materiales.	88
3.2.1.3.4.	Procedimiento.	88
a.	Preparación de los Especímenes o Zonas de Ensayo del Concreto.	89
b.	Ensayo.	89
3.2.1.3.5.	Resultados.	89
3.2.1.3.6.	Criterios de Evaluación	90
3.2.1.4.	Esclerometría.	90
3.2.1.4.1.	Objetivo.	90
3.2.1.4.2.	Definiciones.	91
3.2.1.4.3.	Equipo y Materiales.	91
3.2.1.4.4.	Campo de Aplicación.	91
3.2.1.4.5.	Procedimiento.	91
3.2.1.5.	Profundidad de Carbonatación.	93
3.2.1.5.1.	Objetivo.	93
3.2.1.5.2.	Definiciones.	93
3.2.1.5.3.	Equipo y Materiales.	94
3.2.1.5.4.	Procedimiento.	94
a.	Toma de Testigos.	95
b.	Determinación de la Profundidad de Carbonatación.	95
3.2.1.5.5.	Criterios de Evaluación.	95
a.	Nivel de pH.	95
b.	Cálculo de la Velocidad de Carbonatación.	95
3.2.1.6.	Concentración de Cloruros.	96
3.2.1.6.1.	Objetivo.	96
3.2.1.6.2.	Definiciones.	97
3.2.1.6.3.	Materiales y Equipo.	97
3.2.1.6.4.	Procedimiento.	98
a.	Toma de Testigo.	98
b.	Determinaciones.	98
3.2.1.6.5.	Evaluación de Resultados.	99

3.2.1.7.	Resistencia a Compresión	99
3.2.1.7.1.	Objetivo.	99
3.2.1.7.2.	Definiciones.	100
3.2.1.7.3.	Equipos y Materiales.	100
3.2.1.7.4.	Procedimiento.	100
	a.	
	Identificación de los Lotes a Ensayar.	100
	b.	
	Tamaño de la Muestra.	100
	c.	
	Dimensión de los Testigos.	101
	d.	
	Cuidados Durante la Extracción.	101
	e.	
	Ensayo	101
3.2.1.7.5.	Criterio de Evaluación de Resultados.	103
	a.	
	Con base en el Diseño Estructural:	103
	b.	
	En base a la Durabilidad	103
3.2.1.8.	Porosidad.	103
3.2.1.8.1.	Objetivo.	103
3.2.1.8.2.	Definiciones.	103
3.2.1.8.3.	Equipos y Materiales.	104
3.2.1.8.4.	Procedimiento.	104
	a.	
	Ensayo de Absorción Capilar	104
	b.	
	Ensayo de Absorción de Agua (% de Absorción Total).	105
	c.	
	Ensayo de Porosidad (Porosidad Total).	105
3.2.1.8.5.	Criterios de Evaluación.	106

3.2.2.	EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA ARMADURA.	107
3.2.2.1.	Determinación de la Profundidad y Localización de la Armadura.	107
3.2.2.1.1.	Objetivo.	107
3.2.2.1.2.	Definiciones.	107
3.2.2.1.3.	Equipos y Materiales.	107
3.2.2.1.4.	Procedimiento.	107
a.	Información Preliminar.	107
b.	Localización de la Armadura.	107
c.	Determinación de la Profundidad de la Armadura.	108
3.2.2.1.5.	Levantamiento de la Información.	108
3.2.2.1.6.	Verificación del Funcionamiento del Equipo.	109
3.2.2.2.	Medición de Potenciales.	109
3.2.2.2.1.	Objetivo.	109
3.2.2.2.2.	Definiciones.	109
3.2.2.2.3.	Equipo y Materiales.	109
3.2.2.2.4.	Procedimiento.	109
3.2.2.2.5.	Criterios de Evaluación.	111
3.2.2.3.	Medida de la Velocidad de Corrosión.	112
3.2.2.3.1.	Objetivo.	112
3.2.2.3.2.	Definiciones.	112
3.2.2.3.3.	Equipos y Materiales.	112
3.2.2.3.4.	Procedimiento.	113
3.2.2.3.5.	Criterios de Evaluación.	114
3.3.	DIAGNOSTICO GENERAL DESDE EL PUNTO DE VISTA DE CORROSIÓN	115
3.3.1.	GENERALIDADES.	115
3.3.2.	BASES DE DIAGNOSTICO.	117
3.3.2.1.	Ausencia de Corrosión en la Armadura.	118
3.3.2.2.	Presencia de Corrosión.	118
3.3.3.	PROCEDIMIENTO GENERAL DE DIAGNOSTICO.	126

4. REPARACIONES DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.	127
4.1. ORIENTACION PARA UNA CORRECTA REPARACION Y REHABILITACION.	127
4.1.1. GENERALIDADES.	127
4.1.2. PROCEDIMIENTO GENERAL DE REPARACIÓN.	131
4.1.3. ALTERNATIVAS DE REPARACIÓN.	132
4.1.4. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN O REPARACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.	134
4.1.4.1. Eliminación del Concreto dañado por los Métodos Tradicionales.	134
4.1.4.2. Métodos de reparación del Concreto dañado no Tradicionales.	135
4.1.4.2.1. Protección Catódica (PC).	135
4.1.4.2.2. Realcalinización.	137
4.1.4.2.3. Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC).	137
4.1.4.2.3.1. Antecedentes más Notorios sobre el Fundamento y Aplicación del Método.	137
4.1.4.2.3.2. Fundamentos.	139
4.1.4.2.3.3. Factores que pueden Condicionar la Técnica de EEC.	139
a. El Campo Eléctrico.	139
b. Espesor del Recubrimiento	140
c. Transporte Iónico en Soluciones Acuosas.	140
d. Transporte de Iones en el Concreto.	141
4.1.4.2.3.4. Comportamiento a largo plazo.	142
4.1.4.2.4. Finalización del Tratamiento: Criterios de Aceptación.	142
a. Extracción Electroquímica de Cloruros.	142
b. Realcalinización.	142
c. Para EEC y RAE.	143
4.1.4.2.5. Durabilidad.	143
4.1.4.2.6. Efectos Secundarios.	143
4.1.4.2.7. Costos.	144
4.1.4.2.8. Características de los Métodos de Reparación No Tradicionales o Técnicas Electroquímicas.	144
4.1.4.2.9. Ventajas y Desventajas de los Métodos de Reparación No Tradicionales.	145
5. CONCLUSIONES.	146
6. BIBLIOGRAFIA.	147



1. INTRODUCCIÓN.

1.1. GENERALIDADES.

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

Pasta de Cemento: proviene de la mezcla de agua y cemento.

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

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

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

El que al concreto se le considere hoy como rey universal de los materiales de construcción se debe a sus indiscutibles ventajas:

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

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

1. Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada.
2. Presenta anisotropía (por ejemplo, en su resistencia mecánica).
3. Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo Físico como Químico.

Como se menciona anteriormente, el concreto es un material que resiste mal a la tracción, lo que explica que, desde hace más de un siglo, se presente asociado a refuerzos de acero, constituyendo un material de construcción mixto, el Concreto Reforzado o armado.²





Los iniciadores del concreto armado como material de construcción fueron los franceses Monier y Coignet, que ya en 1867 dieron las reglas para la fabricación de vigas, bóvedas, tubos, etc. Desde entonces, a lo largo de un siglo, la técnica del concreto armado ha experimentado un amplio desarrollo, pudiendo decirse que en la actualidad este material ha llegado a ser de empleo preferente en numerosas aplicaciones, siendo estas más amplias que las de cualquier otro material de construcción.²

A diferencia del concreto en masa, inadecuado para componentes estructurales que hayan de resistir tracciones o flexiones, el concreto armado, que combina la gran resistencia a la compresión propia con la excelente resistencia a la tracción del acero, resistencia de la que carecen las piedras naturales, ofrece unas propiedades excepcionales para la industria de la construcción.²

Además, el costo relativamente bajo de sus componentes, unido a la ilimitada adaptabilidad a las formas más diversas, hace que pueda aplicarse a casi todo tipo de construcciones, de manera competitiva con la piedra, al acero y la madera.

En la actualidad, y desde hace tiempo, el material de construcción más difundido es el concreto; su consumo supera el de cualquier otro. Al principio se pudo haber pensado que el concreto reforzado podría tener una duración ilimitada; sin embargo, en la actualidad se reporta un número cada día creciente de estructuras permanentemente deterioradas por el efecto de la corrosión del acero de refuerzo, ya que una parte muy importante de las estructuras de concreto está reforzada con varillas de acero, y la corrosión de estos refuerzos es la causa principal del deterioro de las mismas. Este deterioro que causa la corrosión, en general, se debe al ataque destructivo de los iones cloruro que penetran desde el exterior por difusión o porque fueron incorporados a la mezcla de concreto y/o a la carbonatación del recubrimiento de concreto. Las primeras observaciones de corrosión del acero embebido en el concreto fueron hechas a principios de este siglo, principalmente en ambientes marinos y plantas químicas. Sin embargo, sólo a mediados del mismo se inició el estudio sistemático de este problema que ha llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre corrosión en el nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucrados.

La corrosión de la armadura ha sido históricamente una de las principales causas de deterioro de las estructuras de concreto, y por consiguiente, uno de los problemas que preocupa seriamente al sector de la construcción en todo el mundo. Las primeras medidas utilizadas consistieron en la mejora de las características del concreto, que ofrecía un entorno alcalino que pasivaba a las armaduras. De esta forma, fueron aumentándose progresivamente los contenidos mínimos de cemento, reduciéndose las relaciones agua/cemento y aumentando los recubrimientos. En la década de los años ochenta comenzó el desarrollo de concretos de altas prestaciones, con lo que se pensaba que el problema quedaría totalmente resuelto, si bien las dificultades prácticas de su utilización han puesto de manifiesto que todavía queda un largo camino por recorrer.¹





La búsqueda de una metodología precisa que conduzca a una respuesta acertada sobre las causas de la corrosión es un objetivo de la investigación en la materia. Es de suma importancia un correcto diagnóstico, existiendo el riesgo de que intervenciones incorrectas reduzcan la durabilidad que tiene la estructura primitiva. Consideraciones de orden técnico y económico determinan las medidas a tomar. La diversidad de procedimientos y productos ofrecidos en el mercado constituye todavía un amplio campo de investigación a partir de los fundamentos teóricos y de los resultados obtenidos en los casos que han sido aplicados.

La corrosión del acero de refuerzo, representa en forma integral el problema de durabilidad que más afecta a las estructuras de concreto. Los costos de mantenimiento de la estructura, como los de corrección o contención de patologías generadas por el fenómeno, cuando estos son técnicamente posibles, son económicamente tan significativos como para que se estimule la investigación científica y tecnológica, así como los procesos de aplicación rápida de los resultados obtenidos. Así pues, por lo tanto, es uno de los deterioros que mayor costo induce en el mantenimiento y operación de las diversas construcciones que se realizan con este material. A nivel mundial se han venido produciendo pérdidas cuantiosas debido a este problema. El informe Hoar calculó pérdidas por corrosión de 250 millones de libras esterlinas en el sector de la construcción del Reino Unido, las que constituían 18 por ciento del total para el año 1971. Con este ejemplo queda claro el orden de magnitud y el tamaño del problema al que nos referimos.

Además en los últimos años ha comenzado a cobrar una gran importancia la durabilidad de las estructuras, y la conciencia de que hay que garantizar una vida útil de las mismas.¹

Garantizar una vida útil de 50 a 100 años puede resultar un quebradero de cabeza en un futuro no muy lejano, sobre todo en zonas especialmente sensibles a procesos de corrosión de las armaduras.¹

La solución a este problema pasa por utilizar de forma adecuada la combinación de diversas medidas, tanto relativas a la ejecución, como a las características de los materiales, o a medidas de protección.¹

El recurso hasta ahora utilizado de aumentar contenidos de cemento o espesores de recubrimiento que ha llegado a su límite técnico. No es conveniente superar contenidos de cemento por encima de 400 kg/m^3 por los riesgos de fisuración que entrañan, ni espesores de recubrimiento por encima de 40mm que harían necesario el empleo de mallas de reparto para evitar su desprendimiento, complicando extremadamente los procesos de ejecución de las estructuras.¹

Las condiciones de puesta en obra deben cuidarse, con el objetivo de alcanzar una elevada compacidad del concreto y un adecuado curado, pero están sujetas al factor humano y pueden fallar en un momento en el que estemos confiados.¹





El problema de la Corrosión es también un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelve 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante. En general, se calcula que su costo económico no es inferior al 2% del producto interno bruto. La corrosión es un campo de las ciencias de materiales que invoca a la vez nociones de química y de física (físico-química).

Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.).

Por lo tanto es de suma importancia recalcar que la calidad y duración de las reparaciones de estructuras de concreto reforzado dependen de la correcta evaluación y de un acertado diagnóstico del problema, basados en adecuados procedimientos de inspección de las estructuras afectadas por este problema; ya que si no se hace adecuadamente podemos causar inadecuadas reparaciones y excesivos gastos económicos en la rehabilitación.

Ante esta situación, parece muy recomendable la toma en consideración de procesos y sistemas de protección contra la corrosión, que se apliquen directamente sobre las armaduras que van a ser objeto de este ataque, sumándose así a la protección que ofrece el concreto que las rodea.¹

Este trabajo, producto de la investigación, proporciona un panorama del estado actual de las dificultades ya que, luego de exponer de una manera clara y concisa las causas y el desarrollo del fenómeno, pasa revista tanto a las técnicas de medición y monitoreo como a los métodos de control que hoy día se utilizan.

1.2. COMPONENTES DE LOS CEMENTOS.

Los cementos son el resultado del perfeccionamiento de los morteros hidráulicos y se forman por reacción del CaO con caolín (SiO_2) o arcillas, cuya fórmula general puede representarse por: $\text{SiO}_2 \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{Fe}_2\text{O}_3$.²

La fabricación tiene lugar en un horno a temperatura elevada. La cal y las arcillas funden a temperaturas muy distintas y la reacción se llevaría a cabo con dificultades. Para facilitar la reacción se utiliza arcillas impuras, o se impurifican con Fe_2O_3 y álcalis, que actúan como fundentes, consiguiéndose una reacción rápida con la cal, formándose un ferrito cálcico que disuelve las arcillas, dando lugar a los silicatos de cal, componentes esenciales del cemento.²





La reacción entre las materias primas que se relacionan en la Tabla 1.1, distinguiéndose entre componentes principales y secundarios, según la proporción en que intervienen, se lleva a cabo en un horno rotatorio, a temperaturas que alcanzan los 1500°C. El proceso tiene lugar a través de un vidrio intermedio entre los gránulos de CaO y SiO₂, el ferrito cálcico, que actúa como disolvente e ionizante. Conviene, pues, un alto grado de molturación para favorecer el contacto íntimo entre la cal y la sílice.²

Tabla 11. Componentes Mineralógicos del Cemento.²

Componentes Principales.	% Medio	Formula
Cal (Oxido de Calcio)	62.5	CaO
Sílice (Anhídrido Silícico)	20.0	SiO ₂
Alúmina (Oxido de Aluminio)	6.5	Al ₂ O ₃
Oxido Férrico	2.0	Fe ₂ O ₃
Componentes Secundarios		
Magnesia (Oxido de Magnesio)	2.0	MgO
Anhídrido Sulfúrico	2.0	SO ₃
Cal Libre (Oxido de Calcio no Combinado)	1.0	Ca
Álcalis (Óxidos de Sodio y Potasio)	0.5	Na ₂ O, K ₂ O
Perdida al Fuego	2.0	P.F.
Residuo Insoluble	1.0	R.I.

Hasta que no se sobrepasan los 1000°C en el horno, no se producen reacciones. Por encima de la citada temperatura empieza la formación de silicatos, aluminatos y ferritos que constituyen el cemento. A unos 1250°C la masa empieza a ablandar y a 1400-1500°C se aglutina en granos de 2-3 cm de diámetro, de un color gris verdoso, que constituyen el denominado clinker. Los pasos sucesivos son:²

- El primer compuesto que se forma es el ferrialuminato tetracálcico, AFC₄, porque es la composición del eutéctico de punto de fusión más bajo. La cantidad formada determina el componente que se halla en menor proporción, el Fe₂O₃.
- A continuación se forma el aluminato tri-cálcico, C₃A, en la cantidad permitida por la alumina no combinada anteriormente, o ferrito bicálcico, C₂F, en el caso de que la proporción de Fe₂O₃ supere a la Al₂O₃.
- La cal sobrante reacciona con la sílice en la materia pastosa formada en el horno, para dar silicato bi-cálcico, C₂S, y la cal aun sobrante da silicato tri-cálcico, C₃S, por reacción con el C₂S.
- Puede quedar aun cal libre si la dosificación de materia prima no es correcta, o si la reacción en el horno ha sido incompleta.





Los componentes secundarios no reaccionan en el horno y quedan en forma de óxidos, igual que en las materias primas, en el clinker. Este clinker se muele con un 5-6% de yeso, habitualmente, para obtener un polvo que se conoce como cemento.²

1.3. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS.

La propiedad esencial de los cementos es dar, mezclados con el agua, una pasta que fragua y endurece, tanto al aire como bajo el agua.²

El cemento se puede amasar con agua y arena, constituyendo los morteros hidráulicos. Si además se añaden piedras o gravilla se obtienen concretos, que se denominan reforzados cuando incluyen refuerzos de hierro.²

Los cementos, amasados solos o en forma de mortero u concreto, solidifican rápidamente por absorción de agua (fraguado), endureciendo después lentamente. Las sustancias que componen el cemento se hidratan, precipitando como geles, que cristalizan después, o directamente, como cristales microscópicos, que crecen y forman un entramado, al que deben su rigidez y resistencia los cementos fraguados.²

Un exceso de CaO es perjudicial y, sobre todo, el MgO, porque se hidratan muy lentamente, terminado el fraguado cuando el cemento ha alcanzado rigidez. Además, como el fenómeno se realiza con aumento de volumen, se pueden producir fracturas en masa.²

Los silicatos son los que proporcionan al fraguar la máxima resistencia. El C_3S fragua rápidamente en 6-7 días, teniendo luego asintóticamente a un límite máximo de resistencia, sin que esta aumente apenas. En cambio, el C_2S fragua con mayor lentitud, alcanzando la resistencia máxima al cabo de un tiempo mucho mayor. La proporción entre ambos puede regular el tiempo de desencofrado, la resistencia a edades tempranas y el calor de hidratación, puesto que el C_3S desprende mucho más calor que el C_2S , etc.²

Un exceso de Al_2O_3 perjudica la calidad del cemento, por que se formara mucho C_3A , que se hidrata instantáneamente, constituyendo puentes entre las partículas y dando rigidez antes de terminar aun el amasado. Los inconvenientes mayores del C_3A son:²

- El fraguado relámpago, y
- La poca resistencia que confiere al cemento, que es atacado por el agua de mar y por las aguas selenitosas.





Los efectos desfavorables del C_3A pueden controlarse con adiciones Fe_2O_3 , que consumen la alúmina en forma de AFC_4 antes de que se forme el C_3A . Normalmente queda un exceso de Al_2O_3 sin combinar que reacciona después para dar C_3A . Cuando hay suficiente Fe_2O_3 , después del AFC_4 se forma ferrito bi-cálcico, C_2F , en lugar del C_3A y después se obtienen los componentes esenciales del cemento, los C_3S y C_2S .²

Otra forma de evitar el fraguado relámpago del C_3A consiste en añadir al clinker $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, que se combina con el C_3A formando sal del Candlot, un sulfoaluminato cálcico hidratado. La hidratación del C_3A no se produce mientras exista yeso que pueda formar sulfoaluminatos. El yeso es pues un retardador de fraguado que, evitando el fraguado relámpago, facilita la puesta en obra del concreto. No obstante conviene no añadir un exceso de yeso y que quede algo de C_3A libre, que inicie el fraguado sin llegar a producir una rigidez instantánea.²

Cuando se emplea hemihidrato, $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$, en lugar del dihidrato, se produce un "falso fraguado", que no debe confundirse con el fraguado relámpago. El hemihidrato fragua por si mismo, en forma instantánea en presencia del cemento, dando lugar a una rigidez pasajera de la pasta, que desaparece al seguir amasando, con el paso de hemihidrato a dihidrato.²

La hidratación no termina con el fraguado, si no que puede seguir a lo largo de días y meses, continuando el proceso y el endurecimiento a costa del agua de los poros. Solo cuando el cemento se ha hidratado totalmente alcanza su resistencia mecánica definitiva.²

La contribución de los principales componentes mineralógicos del clinker a las características del fraguado y a las propiedades finales del concreto se resumen en la Tabla 1.2.²

Tabla 1.2. Propiedades Conferidas por los Distintos Componentes del Cemento.²

Componente	Velocidad de Hidratación	Resistencia Mecánica	Calor de Hidratación
C_3S	Grande	Grande y Rápida	Elevado (20 cal/gr)
C_2S	Pequeña	Grande pero Diferida	Diferido (60 cal/gr)
C_3A	Instantánea	Pequeña y rápida	Elevado y Rápido (210 cal/gr)
AFC_4	Media	Pequeña y lenta	Medio (100 cal/gr)
CaO	Lenta	----	Alto (279 cal/gr)
MgO	Lentísima	----	Alto (203 cal/gr)

Considerando como impurezas todos los componentes a excepción de la cal y la sílice, se puede representar la composición de todos los cementos en diagramas ternarios simplificados.²

Cuanto mayor sea la proporción de impurezas menos resistentes serán los cementos, pero también sería menor su punto de fusión y se consumiría menos energía en la fabricación. Teniendo en cuenta la velocidad de fraguado del C_3S y del C_2S , aumentara la rapidez de fraguado al hacerlo la relación C_3S / C_2S .²





1.4. DURABILIDAD DEL CONCRETO REFORZADO.

Cuando el concreto reforzado empezó a ser utilizado en la fabricación de estructuras se pensó que su durabilidad era ilimitada debido a que su apariencia es la de un pétreo, y a la doble protección que reciben las armaduras embebidas en él: por un lado la barrera física que aporta el recubrimiento, y por otro la protección química proporcionada con la alcalinidad del cemento.⁷

Aunque el concreto tiene la apariencia de ser un material denso y pétreo, por su constitución, es un material poroso que permite la entrada de los líquidos y los gases procedentes del exterior, y su transporte por la red de poros ya sea por capilaridad o por difusión; y por consiguiente puede resultar de importancia crítica en su durabilidad. Frecuentemente el fallo prematuro es atribuible a la baja calidad del concreto (relaciones agua/cemento demasiadas altas, relaciones cemento/áridos demasiado bajas, puesta en obra inadecuada, etc.).^{7,2}

La porosidad adquirida por el concreto es debida al exceso de agua necesario en el amasado para hacer trabajable la mezcla y para conseguir una buena hidratación del cemento. Cuando se produce el fraguado, el agua sobrante que contiene el concreto puede quedar en el interior del mismo o bien evaporarse, dejando una red de canalículos variados en tamaño. Esta red de poros supone un camino por el cual los agentes externos pueden llegar a dañar tanto al propio concreto como a la armadura. Además de forma aproximada, podemos decir que la resistencia del concreto es inversamente proporcional a su porosidad. El volumen total de poros depende, fundamentalmente, de la relación a/c. cualquier reducción de dicha relación mediante el uso de mezclas y granulometrías adecuadas, o agentes fluidificantes va a repercutir directamente en un aumento de las resistencias mecánicas y de la impermeabilidad.⁷

Por otra parte, el hecho de que el cemento aporte un alto grado de alcalinidad, supone que el concreto sea un material predispuesto a reaccionar con todos los agentes de carácter ácido que provengan del exterior.⁷

La interacción entre el concreto y el medio ambiente es el principal factor de deterioro de las estructuras. El desconocimiento del comportamiento de la estructura frente al grado de agresividad del medio donde esta ubicada y de los mecanismos de ataque de los agentes agresivos eran las principales causas de que no se tomaran las medidas adecuadas de protección. Actualmente la preocupación por la durabilidad de las estructuras es mayor, y los estudios que se realizan al respecto se han incrementado en gran número.⁷

El principal agresivo para el concreto es el agua, ya que es el vehículo de transporte de todos los agentes agresivos al interior del concreto. Dichos agentes pueden ser clasificados en tres categorías: agentes químicos, físicos y biológicos. Los deterioros que pueden ocasionar en el concreto en función del tipo de agente agresivo son los mostrados en la Tabla 1.3.⁷





Tabla 1.3. Principales Factores Físico, Químico y Biológicos que limitan la Durabilidad del Concreto.⁷

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

En general la calidad del concreto, expresada en término de permeabilidad o penetrabilidad, es la característica principal a la hora de determinar su durabilidad.²

Como ya se ha expuesto, debido a la escasa resistencia a la tracción del concreto la inmensa mayoría de las estructuras se proyectan en concreto armado o reforzado, la durabilidad del cual resulta limitada esencialmente por la corrosión de las armaduras.²

Todas las excelentes propiedades, ya enumeradas, del concreto como material de construcción, resultarían valdías si no fuera por una propiedad adicional no considerada hasta ahora, su capacidad de proteger las armaduras embebidas en él contra la corrosión.²

Dicha capacidad la confiere el elevado pH del concreto, mayor que 12.6, impuesto por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado en la hidratación de los componentes mayoritarios del cemento: C_3S y C_2S , que garantiza la pasividad de las armaduras y, con ello, su larga vida en servicio.²

1.4.1. ATAQUE POR AGENTES QUÍMICOS.

- **Deslavado/Lixiviación:**

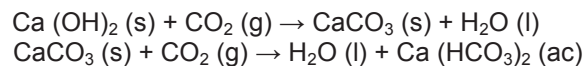
Consiste en la descalcificación de las fases del cemento por efecto de un lavado continuo con aguas puras o carbónicas. Esta descalcificación lleva a la disgregación de la pasta, al desmoronamiento del conjunto y a la formación de eflorescencias superficiales.⁷





- **Ácidos.**

Al ser el concreto un material de naturaleza alcalina, los ácidos reaccionan con los hidróxidos (cálcico, sódico y potásico) para formar sales y agua. Cabe destacar la acción de los gases de carácter ácido presentes en ambientes urbanos e industriales como el CO₂ y los distintos óxidos de azufre y nitrógeno. En el caso del CO₂ pueden dar fenómenos de disolución y precipitación dada la solubilidad de los bicarbonatos.⁷



No obstante en las condiciones de exposición naturales, la única reacción que se da en el concreto es la primera, conocida como reacción de carbonatación, y que tiene como consecuencia una disminución de la basicidad del concreto, detectable mediante el ensayo de la fenolftaleína, y que puede despasar las armaduras de acero embebidas.⁷

- **Sulfatos.**

La reacción básica consiste en la formación de ettringita (C₃AH₃23CS) a partir de la reacción de los iones sulfatos con los aluminatos del cemento. Este compuesto es muy expansivo por lo que produce la disgregación de toda la masa con pérdidas de resistencias muy notables. Una forma de evitar este fenómeno es mediante el uso de cementos con bajo contenido en aluminatos o cementos de adición.⁷

- **Agua de Mar.**

Contiene sulfatos, ión magnesio, cloruro sódico y otros componentes de menor importancia en lo que al ataque al concreto se refiere. Los cloruros rebajan la agresividad de los sulfatos y el magnesio precipita como hidróxido, pudiendo colmatar los poros impermeabilizando así al concreto. Pero a pesar de todo esto, las acciones que se producen son de elevada importancia, tales como: deslavado, recubrimientos, formación de la sal de Friedel con la expansión que conlleva, etc.⁷

Una manera de paliar estas acciones es mediante el uso de cemento Pórtland resistente al agua de mar.⁷

- **Reacción Árido-Álcali.**

Este tipo de ataque consiste en la reacción de los álcalis del cemento (hidróxidos de sodio y potasio) con algunos tipos de áridos que contienen sílice pobremente cristalizada o amorfa, formándose silicatos (geles) expansivos que absorben agua provocando el desmoronamiento del concreto.⁷

Las medidas preventivas son el uso de cementos con un contenido en óxido de sodio equivalente menor al 0.6%, y mediante la adición de puzolanas.⁷





- **Sales Amoniacales y Magnésicas.**

Las sales de magnesio o amoniacaes reaccionan con el hidróxido cálcico dando sales cálcicas solubles, produciendo la descalcificación del concreto.⁷

La protección consiste en el uso de recubrimientos impermeabilizantes.⁷

1.4.2. ATAQUE POS AGENTES FÍSICOS.

- **Fisuración. Cambios de Temperatura.**

Debido a cambios de temperatura bruscos durante el proceso de fraguado y endurecimiento del concreto, si no se ha previsto la existencia de juntas de dilatación, el concreto puede sufrir elevadas retracciones produciendo fisuras.⁷

Este efecto puede verse minimizado con la utilización de cementos con calores de hidratación adecuados a la geometría de la pieza y por medio de un buen curado.⁷

- **Hielo-Deshielo.**

Este fenómeno se produce en lugares de climas fríos, donde las heladas son abundantes y juegan un papel a tener en cuenta. Este ataque provoca el desmoronamiento superficial del concreto, disminuyendo de esta forma los recubrimientos dados a los redondos de acero.⁷

Peden evitarse con el uso de inclusores de aire que, con las burbujas aisladas que introducen en el concreto aíslan la red capilar, haciendo así un concreto mas impermeable y capaz de resistir las tensiones causadas por la formación de hielo.⁷

- **Erosión.**

La erosión y abrasión sufrida por cada concreto dependerá del agente abrasivo al que vaya a estar expuesto.⁷

Una disminución de este efecto se puede conseguir con el empleo de áridos adecuados e incluso con recubrimientos protectores.⁷

- **Recristalización de sales.**

Este fenómeno tiene consecuencias similares a las de hielo-deshielo, al producirse un aumento de volumen de los cristales formados respecto a los anteriores. Además da lugar a eflorescencias superficiales.⁷

1.4.3. ATAQUE POR AGENTE BIOLÓGICOS.

Este tipo de ataque tiene lugar a generarse a partir de bacterias, proteínas, etc.; compuestos de azufre o compuestos ácidos que atacarán al concreto.⁷

Puesto que la porosidad tiene un papel determinante a la hora de ser atacada una estructura por los agentes agresivos, es muy importante que durante la ejecución de la estructura haya un control exhaustivo de los factores que influyan en la porosidad del concreto y en las fisuras que en el futuro puedan aparecer.⁷





2. ESTADO DEL ARTE.

A pesar de la variedad de procesos nocivos para el concreto, el problema más importante para las estructuras mixtas concreto-acero como se ha recalcado con anterioridad, es la corrosión de las armaduras de acero embebidas en el concreto. Esta supone un elevado coste económico. En un estudio realizado sobre los daños ocasionados por la corrosión de armaduras, cabe destacar que más del 40% de los puentes de autopista de USA son deficientes estructuralmente u obsoletos funcionalmente. El coste de las reparaciones y sustituciones se estima en 70 000 millones de dólares USA, siendo aproximadamente el 20% de los costes debidos a la corrosión de las armaduras, por el empleo de sales de deshielo (*Liu 1998*).⁷

En España, los costes por este concepto son inferiores, gracias a la climatología menos extrema, cifrándose en 200 000 millones de pesetas anualmente.⁷

De la encuesta sobre patología elaborada por el Grupo Español del Concreto en 1992 se refleja que el 15% de las manifestaciones de daño se deben a problemas de corrosión de armaduras. La mayoría de los casos se han dado en ambientes de humedad media o alta y en ambientes urbanos o marinos. El coste de la reparación ha sido de un valor medio, comparado con el coste debido a la reparación de otra serie de daños, si bien en el 6% de los casos hubo que proceder a la demolición de la estructura. Finalmente, el 67.6% de los casos se han dado en edificios de más de 10 años.⁷

2.1. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN.

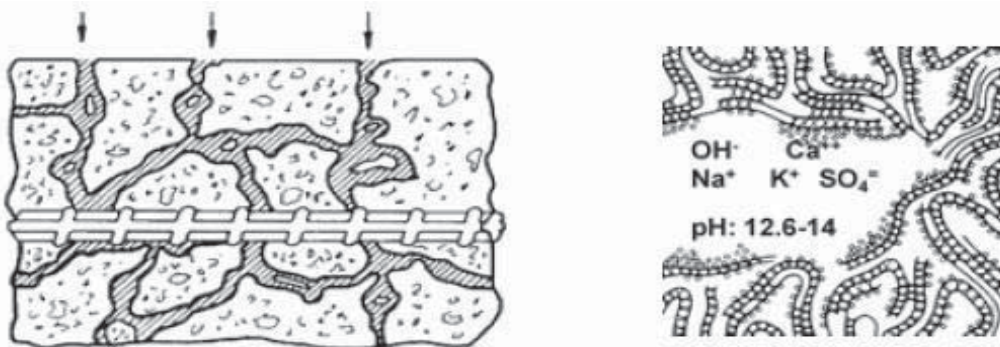
El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera. Esta solución acuosa está constituida principalmente por iones OH^- a los que se debe su alta alcalinidad. Inicialmente se pensó que el hidróxido de calcio producido durante las reacciones de curado era el componente principal que generaba esta alta alcalinidad; sin embargo, se ha demostrado que el pH de la solución en los poros es de 13 a 14, lo cual es debido a los hidróxidos de sodio y potasio, ya que el ion calcio prácticamente desaparece de la disolución cuando el cemento progresa en su hidratación. La cantidad relativa de cada una de esos iones depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, del grado de hidratación y de la relación agua/cemento.⁴





A esta elevada alcalinidad y el contenido de O_2 normal del ambiente en las estructuras aéreas, el acero se recubre de una capa pasiva de óxidos muy adherentes, compactos e invisibles, que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras que el concreto sea de buena calidad y no cambie sus características físico-químicas por acción del medio exterior. Por otra parte, en ausencia de oxígeno, el refuerzo de acero se oxidara muy lentamente sin causar problemas de corrosión del mismo, como es el caso de las estructuras sumergidas, donde el concreto no se encuentra agrietado.⁴

Figura 2.1. Armadura embebida en Concreto. Alcalinidad de la fase acuosa de lo Poros.¹



2.1.1. CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO.

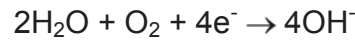
Se entiende por corrosión a la reacción de un metal o aleación con el medio. Por este proceso los metales pasan de su estado elemental, a su estado combinado de origen que presentan en la naturaleza, formando compuestos con otros elementos, como óxidos, sulfuros, etc. El proceso mediante el cual el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía, y se produce mediante una reacción espontánea. Este último proceso, que se trata de una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina del metal.⁷

Si la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuoso, se trata de un fenómeno de ataque electroquímico, es decir, se produce una reacción de oxidación y otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. De esta manera, en la superficie del metal se generan dos zonas, una de ellas actuara como ánodo y ahí tendrá lugar la oxidación del metal, liberando electrones, que emigran a través del metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. En medios ácidos, estas sustancias serán los iones hidrogeno, y en medios alcalinos y neutros se trata de oxígeno disuelto en agua.





Anódica

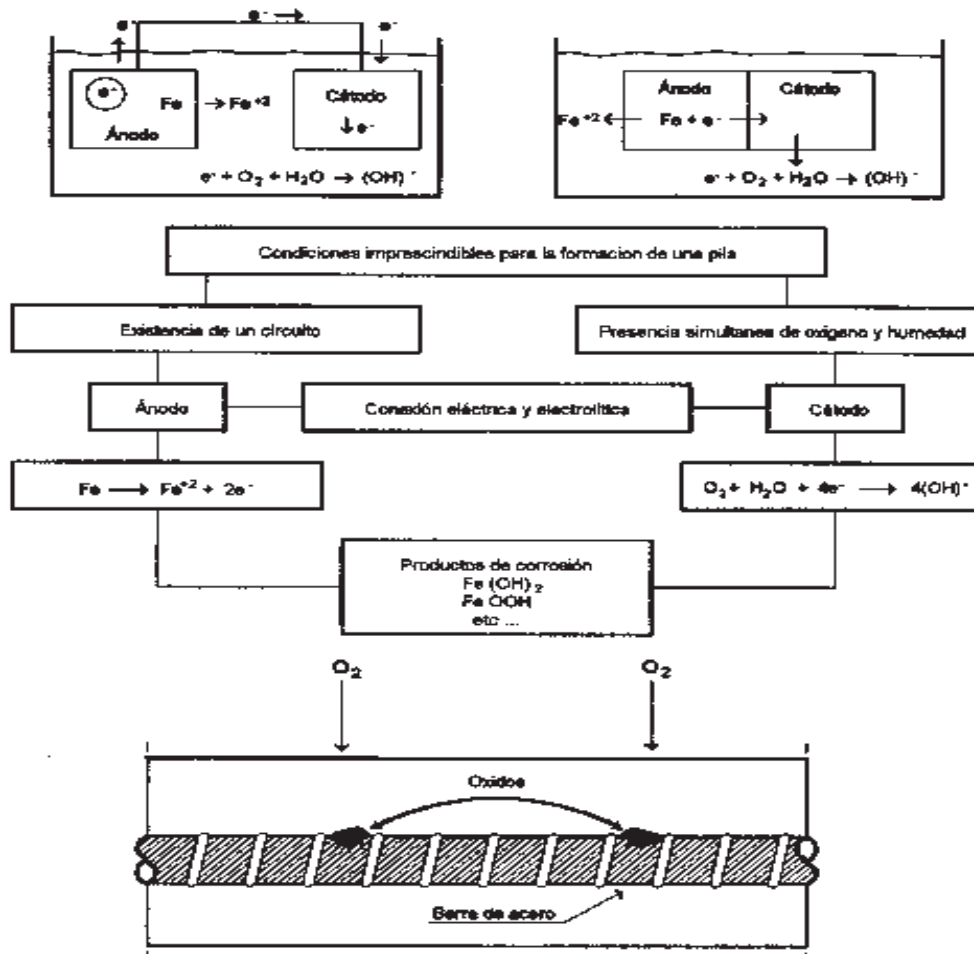


Catódica

Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica o celda de corrosión (Figura 2.2), la cual consiste en 4 elementos principales: un ánodo, que emite electrones por lo cual se verifica la oxidación; un cátodo, que recibe electrones y en ella se verifica la reducción; un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones y un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.⁴

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

Figura 2.2. Formación de un Pila electroquímica.





La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con los metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero. Ahora bien, aunque la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la falta de uniformidad del acero en concreto, la corrosión normalmente se previene por la formación de esa película de óxido de hierro "pasivante" mencionada con anterioridad. Pero, cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esta película y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia:⁴

- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido,
- El concreto puede fisurarse o deslaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse y,
- La adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece.⁴

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:⁴

- a) Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido y,
- b) Por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno.⁴

Como la corrosión tiene lugar en un medio acuoso, se pueden originar iones en disolución que intervienen en reacciones de equilibrio con otros iones del medio, incluidos los del agua. La reacción de corrosión depende de una serie de reacciones en las que intervienen, directa o indirectamente, los iones del agua, por lo tanto, dependen del pH del medio. Como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación en términos de pH, los cuales se presentan gráficamente en diagramas de E - pH, conocidos como diagramas de Pourbaix (Figura 2.3).⁷

Los diagramas de Pourbaix establecen que para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune.⁷



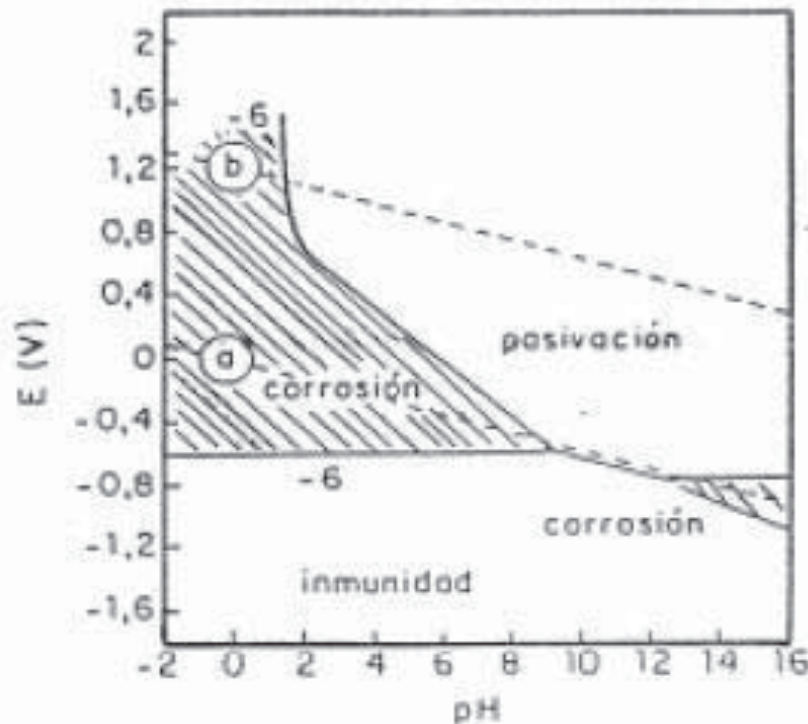


Figura 2.3. Diagrama de Pourbaix para el Fe a 25 °C.⁷

En el estado que se conoce como de pasividad, el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa como de barrera impidiendo la posterior oxidación. En el estado de "Inmunidad" el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.⁷

También es conveniente destacar que no solo es necesario considerar si un metal dado se corroe o no, si no también la velocidad a la que lo hace, ya que, la corrosión puede tener lugar tan lentamente que a efectos de vida útil sea despreciable. En la cinética del proceso corrosivo influye fundamentalmente la naturaleza del electrolito, el contenido de oxígeno, la temperatura y la resistividad del medio.⁷

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero, cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, lo detienen completamente.⁴





A continuación se muestra un cuadro descriptivo de algunas condiciones para que exista o no corrosión del acero en concreto.⁴

PARA QUE HAYA CORROSIÓN	
<i>pH < 8.0</i>	<i>pH > 8.0</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Oxígeno • Agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxígeno • Agua • Cloruros
PARA QUE NO HAYA CORROSIÓN	
<i>Mantenga fuera del Concreto Armado alguna de las Siguientes Opciones</i>	<i>Coloque en el Concreto Armado alguna de las Siguientes Opciones</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Oxígeno • Agua • Cloruros 	<ul style="list-style-type: none"> • Iones Hidróxilos • Potencial Negativo sobre el Acero • Iones Ferrosos • Inhibidor

Así, los problemas de corrosión del acero estructural están íntimamente asociados a la despasivación del mismo, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico sobre las distintas interfases concreto/acero y de las diferencias metalúrgicas y mecánicas del metal. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes eléctricas llevando a la formación de áreas anódicas y catódicas que constituyen las celdas de corrosión.

2.1.2. TIPOS DE CORROSIÓN.

Atendiendo a la cantidad de área corroída, se puede considerar dos tipos de corrosión: Generalizada y Localizada, como se muestra en la Figura 2.4.⁷

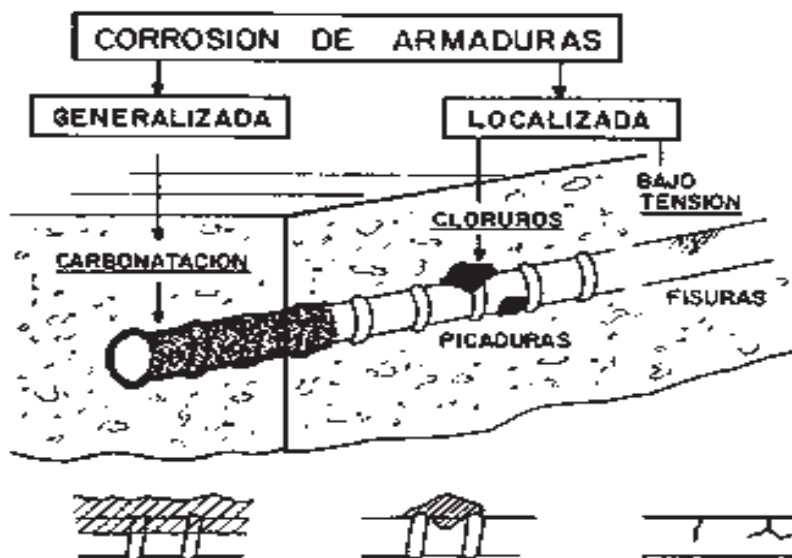


Figura 2.4.- Esquema sobre los tipos de corrosión de armaduras y causas.⁷





2.1.2.1. Corrosión Generalizada o Uniforme.

Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial. A su vez, esta clase de corrosión se subdivide en otras: ⁵

a. Atmosférica.

De todas las formas de corrosión, la Atmosférica es la que produce mayor cantidad de daños en el material y en mayor proporción. Grandes cantidades de metal de automóviles, puentes o edificios están expuestas a la atmósfera y por lo mismo se ven atacados por oxígeno y agua. La severidad de esta clase de corrosión se incrementa cuando la sal, los compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos están presentes. Para hablar de esta clase de corrosión es mejor dividirla según ambientes. Los ambientes atmosféricos son los siguientes: ⁵

- Industriales.

Son los que contienen compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que pueden promover la corrosión de los metales. En adición, los ambientes industriales contienen una gran cantidad de partículas aerotransportadas, lo que produce un aumento en la corrosión. ⁵

- Marinos.

Esta clase de ambientes se caracterizan por la presencia de cloruro, un ión particularmente perjudicial que favorece la corrosión de muchos sistemas metálicos. ⁵

- Rurales.

En estos ambientes se produce la menor clase de corrosión atmosférica, caracterizada por bajos niveles de compuestos ácidos y otras especies agresivas.

Existen factores que influyen la corrosión atmosférica. Ellos son la Temperatura, la Presencia de Contaminantes en el Ambiente y la Humedad. ⁵

b. Corrosión Galvánica.

Es la más común de todas y se establece cuando dos metales distintos (con distinto par redox) entre sí se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo una solución conductiva) y actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo. ⁴





En el caso del acero en el concreto, esta situación se dará cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo. También se podría presentar cuando el refuerzo se encuentre en contacto con otros conductores más nobles. En general, se asocia al funcionamiento de una macrocelda. Un ejemplo típico es el caso de armaduras exteriores que se corroen al ingresar los cloruros, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas.⁴

2.1.2.2. Corrosión Localizada.

Corrosión en donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas.

Al igual que la General/Uniforme, la corrosión Localizada se subdivide en otros tipos de corrosión. A continuación, veremos los más destacados.⁵

a. Corrosión por Picaduras o "Pitting".

Es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas "picaduras" en el cuerpo que afectan; formadas por la disolución localizada de la película pasiva típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea por que provienen del medio exterior o por que fueron incorporados en la masa del concreto.⁴

De esta manera, se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras. Como ya es conocido, las picaduras son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento.

En el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para formar H^+ y Cl^- libre. Esto decrece el pH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio para seguir interviniendo en el proceso de corrosión, agravando el problema.

b. Corrosión en Espacios Confinados.

La corrosión de este tipo puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo del oxígeno a esa zona, pudiendo crearse celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo.⁴

Existen varias situaciones que pueden inducir a este daño. Entre ellas se puede mencionar la inyección de grietas (estructurales o por corrosión) con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al refuerzo, siendo esta zona donde la corrosión se aceleraría por la falta de acceso de oxígeno.





Otro ejemplo puede ser la corrosión de acero de refuerzo con revestimientos, como por ejemplo en caso de uso de epóxicos, cuando la adhesión entre este y el acero se han deteriorado. Adicionalmente, si hay iones cloruro en el concreto, estos pueden acumularse en el intersticio resultante entre el recubrimiento y el acero. El pH dentro de ese espacio confinado disminuye y el proceso de corrosión se sigue agravando por un proceso autocatalítico, similar al de corrosión por picadura, todo lo cual origina una mayor pérdida de adherencia. El deterioro de la adherencia en el acero y el recubrimiento se puede producir por un daño mecánico (durante el doblado de las varillas) o por procesos electroquímicos que pudieran darse en el hormigón aun antes que los iones cloruro lo penetren.⁴

c. Corrosión bajo Tensión.

Este tipo de corrosión ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo, en donde se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrogeno atómico difundiendo a través del metal. Este hidrogeno puede provenir de diferentes fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. Este daño produce también fragilidad por hidrogeno. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del concreto, o la presencia de determinados iones, generalmente aportados por algunos aditivos, o al uso de un determinado tipo de acero (templado o revenido).⁴

En el caso de aceros pretensados, la presencia de picaduras por corrosión causadas por iones cloruro, puede inducir a que el acero presente corrosión por tensiones.⁴

La única manera de confirmar la fragilidad por hidrogeno o la corrosión bajo tensión es mediante la observación microscópica de las superficies de fractura. Este daño es considerado del tipo catastrófico, ya que esta asociado a una pérdida de ductilidad y a la fractura de la armadura.⁴

d. Corrosión por Corrientes de Interferencia.

Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga, pueden ser definidas como las corrientes que fluyen en una estructura y que forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que ocurra corrosión por corrientes de interferencia debe existir un intercambio de corrientes entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene el efecto mas pronunciado sobre la corrosión, ya que ésta fluye continuamente en un solo sentido. Por el contrario, la corriente alterna, que interviene su dirección alrededor de una centena de veces por segundo, puede causar un efecto menos pronunciado.⁴





Las fuentes más comunes de este tipo de corrientes son: sistemas de protección catódica operando en las cercanías de las estructuras de concreto reforzado, especialmente en medios de muy baja resistividad, como lo es el agua salobre; sistemas con potencia eléctrica, como los trenes eléctricos; máquinas de soldar, donde la estructura conectada a tierra se encuentra a cierta distancia de los electrodos de soldar; corrientes telúricas (asociadas a la actividad solar y al campo magnético de la tierra). Independientemente de la fuente, las corrientes que fluyen en un medio electrolítico son manifestaciones de diferencias de voltaje. Si en el entorno de estos gradientes de voltaje, se encuentra una estructura de concreto reforzado, puede existir un intercambio de corriente con el mismo, donde el punto de entrada de corriente actuaría como cátodo, pero la salida sería la zona anódica que podría causar la disolución del metal, corroyéndolo.⁴

Es importante que si el acero se encuentra pasivado no contaminado por cloruros, esta corriente de interferencia no produciría la corrosión del refuerzo, ya que podría mantener pasivo o llevar a la zona de inmunidad. Por el contrario si el concreto contiene cloruros, la corrosión del refuerzo se vería acelerada drásticamente por el efecto de estas corrientes.⁴

2.1.2.3. Corrosión microbiológica (MIC)

Es aquella corrosión en la cual organismos biológicos son la causa única de la falla o actúan como aceleradores del proceso corrosivo localizado.⁵

La MIC se produce generalmente en medios acuosos en donde los metales están sumergidos o flotantes. Por lo mismo, es una clase común de corrosión.⁵

Los organismos biológicos presentes en el agua actúan en la superficie del metal, acelerando el transporte del oxígeno a la superficie del metal, acelerando o produciendo, en su defecto, el proceso de la corrosión

Se han identificado algunas especies hidrógeno dependientes que usan el hidrógeno disuelto del agua en sus procesos metabólicos provocando una diferencia de potencial del medio circundante. Su accionar está asociado al *Pitting* (picado) del oxígeno o la presencia de ácido sulfhídrico en el medio. En este caso se clasifican las ferróbacterias.³

2.1.2.4. Corrosión electroquímica o polarizada.

La corrosión electroquímica se establece cuando en una misma superficie metálica ocurre una diferencia de potencial en zonas muy próximas entre sí en donde se establece una migración electrónica desde aquella en que se verifica el potencial de oxidación más elevado, llamado área anódica hacia aquella donde se verifica el potencial de oxidación (este término ha quedado obsoleto, actualmente se estipula como potencial de reducción) más bajo, llamado área catódica.³

El conjunto de las dos semi reacciones constituye una célula de corrosión electroquímica.³





2.1.3. FACTORES QUE AFECTAN, DESENCADENAN Y ACELERAN LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS.

Se denomina así a aquel conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el concreto. Ya se mencionó con anterioridad, que la corrosión solo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (< 8), por lo que serán pues factores que afectan o desencadenan todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del concreto o bien, como es el caso de las fisuras o coqueas, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el concreto.⁴

Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos en el proceso de corrosión de las armaduras. De tal manera que: la dosificación, la compactación y la homogeneidad del concreto, así como el espesor del recubrimiento del concreto, el estado superficial de la armadura y la humedad ambiental son los factores que afectan este proceso. Por otra parte, los factores desencadenantes que con más frecuencia dan lugar a la corrosión de la armadura son: presencia de cangrejas en contacto con la armadura, altas tensiones mecánicas en el acero, corrientes erráticas o de interferencia, contacto galvánico entre dos metales, iones despasivantes (Cl^- , SO_4^{2-} , etc.) CO_2 atmosférico o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad, lixiviación por aguas blandas y las fisuras, presentando estos últimos, ambos efectos.⁴

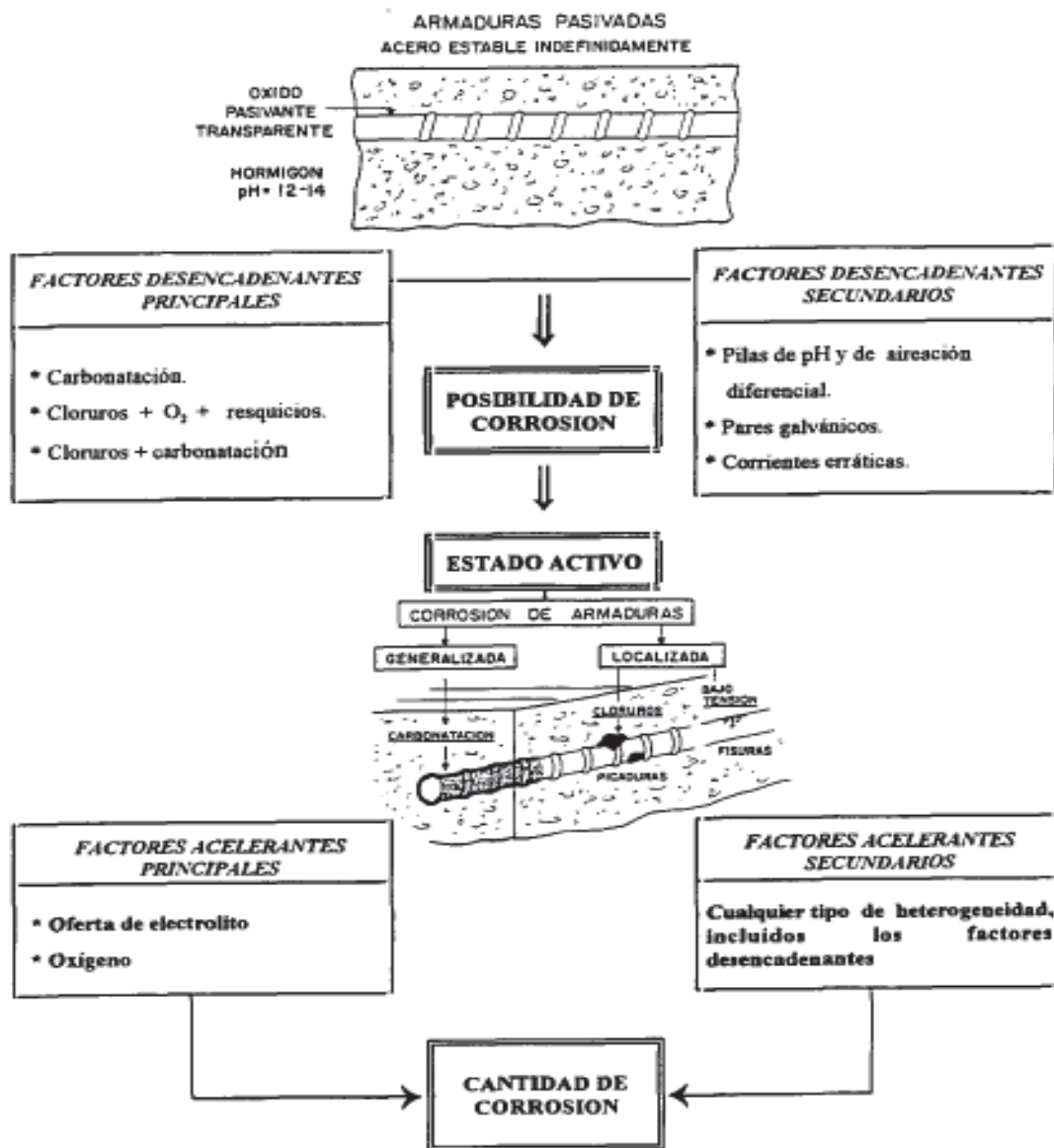
Sin embargo, que la corrosión se desencadene, porque las condiciones termodinámicas sean favorables para ello, no significa que progrese a velocidad significativa. Aquellos factores de corrosión que no son capaces de desencadenar el proceso, pero que condicionan la peligrosidad del mismo, haciendo que se desarrolle a velocidad apreciable, son los denominados factores condicionantes, que pueden ser acelerantes o retardadores del ataque. Los factores condicionantes o acelerantes son la presencia de oxígeno y el agua o humedad. Sin la presencia de oxígeno y agua resulta imposible la corrosión electroquímica y sin una cantidad mínima, esta no puede desarrollarse a velocidades apreciables.^{2,7}

En el esquema de la Figura 2.5 se intenta representar la situación, teniendo en cuenta que los cloruros, por sí solo, en contra de la opinión tradicional no son capaces de iniciar la corrosión en estado activo de las armaduras, necesitando, en los primeros momentos, el concurso del oxígeno y de resquicios u otro tipo de heterogeneidades en la interfase acero/concreto.²





Figura 2.5. Factores desencadenantes y Condicionantes de la Corrosión de las Estructuras de Concreto Armado.²



2.1.3.1. Dosificación del Concreto.

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos.⁴

La dosificación del concreto es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de éste, como elemento protector del acero de refuerzo.⁴





El concreto que envuelve las barras de acero de una armadura debe cumplir una doble función protectora: a) como barrera física que se opone a la penetración de los agentes externos y b) creando una capa pasivante sobre el acero - en virtud de su alcalinidad - que lo mantiene protegido durante un tiempo indefinido. Tendiendo en consideración estas dos funciones del concreto de recubrimiento del acero, es determinante dosificarlo por métodos que proporcionen su máxima compacidad, lo que significa garantizar su mínima porosidad.⁴

La porosidad de la masa del hormigón la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos externos, razón por la cual la relación agua-cemento, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el concreto. Los nuevos conocimientos científicos avalados por la práctica de producción, aportan que en el diseño de las mezclas de hormigón hay que tener en cuenta los siguientes factores que garanticen su máxima compacidad y por ende, su durabilidad:⁴

- a) La forma de proporcionar los áridos componentes de la mezcla, que garantice el menor volumen de vacío que será ocupado por la pasta de cemento endurecida.
- b) La influencia que ejerce la cantidad de agua de la mezcla en la consistencia del concreto en estado fresco.
- c) La influencia de la relación agua-cemento, la cual podrá ser mejorada substancialmente con el uso de aditivos químicos.
- d) La influencia del grado de hidratación del cemento en la cantidad de poros del hormigón endurecido.
- e) La influencia de la característica de los áridos que se emplean en la calidad final del concreto.
- f) La acción positiva de ciertas adiciones activas al cemento.⁴

2.1.3.2. Compacidad y Homogeneidad.

La compacidad del concreto es la propiedad más importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Ella es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la compacidad, expresa en qué magnitud está protegido el acero de la armadura minimizando significativamente la carbonatación y el ataque de los cloruros, que son los agentes agresivos más importantes.⁴

La compacidad del concreto está expresada por la cantidad de materia sólida que está contenida en una unidad cúbica, o es la relación entre el volumen sólido y el volumen aparente total. Esta se mide como la relación entre la suma de los volúmenes absolutos de materias sólidas (grava, arena y pasta de cemento endurecida) contenida en un metro cúbico de concreto, referido al volumen aparente del mismo.⁴





La compactación es función, principalmente, de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, cumpliéndose con esta condición, la compactación puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del concreto, propiciando la segregación de los materiales. De igual manera, la segregación puede producirse por un procedimiento deficiente en la colocación del concreto y/o inadecuado proceso de compactación.⁴

Las mezclas con relación agua-cemento baja (< 4) son usadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad). Sin embargo, un curado deficiente de estas mezclas impide la hidratación del cemento, principalmente en la superficie del concreto, lo cual se manifestara en un incremento de la porosidad y por lo tanto en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.⁴

Por otra parte, la homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la estructura fabricada con el mismo concreto, resulten prácticamente iguales. El concreto, por su origen, es un material heterogéneo y se puede lograr su homogeneidad mediante un adecuado proceso tecnológico de producción, transporte, colocación, compactación y curado.⁴

De tal manera que un concreto que tenga una adecuada compactación y homogeneidad garantizaría la protección de la armadura, en el ambiente específico para el cual fue diseñada la mezcla. En la práctica, para obtener esto se debe cumplir con una serie de actividades secuenciales, las cuales se encuentran íntimamente ligadas entre sí. Estas actividades son: buena selección y proporcionamiento de los materiales, buena operación de mezclado y buena ejecución de los procedimientos de transporte, colocación, compactación, curado y donde sea aplicable, una cuidadosa operación de desmolde.⁴

2.1.3.3. Espesor y Recubrimiento del Concreto.

La protección que confiere el concreto que recubre las barras de acero de una estructura de concreto armado o pretensado dependerá del grado de impermeabilidad de este, que a su vez estará dada por su compactación y homogeneidad en esta zona.⁴

En muchos casos esta capa de concreto no cumple con sus funciones específicas por que suele ser menos compacta y más porosa que el resto del volumen que constituye el elemento. Este fenómeno puede producirse por varias causas, siendo la más importante una mala compactación del concreto.⁴





El espesor de esta capa de concreto es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va estar expuesto. Existen normas internacionales en las que se especifican los espesores adecuados de acuerdo con al agresividad ambiental.⁴

Sin embargo, estructuralmente es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, ya que por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse afectada por fisuración, particularmente si el elemento esta sometido a esfuerzos de tracción. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de agua-cemento, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas permitan una alta durabilidad de la estructura.⁴

Es necesario considerar el papel de las grietas en el concreto, ya que estas pueden reducir la efectividad protectora del recubrimiento y de este modo reducir la vida útil de la estructura, al permitir una penetración mas rápida de los iones cloruro, el dióxido de carbono, el agua y el oxígeno y el ataque del acero refuerzo. El efecto de las grietas esta en función de su origen, anchura, intensidad y orientación.⁴

2.1.3.4. Humedad Ambiental.

El concreto absorbe fácilmente la humedad ambiental, pero tarda mucho tiempo en secarse. Esto da lugar a que la humedad del interior del concreto sea superior a la humedad del ambiente.⁷

Si la humedad exterior permanece constante, se establece un equilibrio entre el contenido de humedad en el interior y la humedad ambiental (HR, humedad relativa). Pero si por el contrario, la humedad ambiental oscila, el interior del concreto no puede seguir los cambios a la misma velocidad, por lo tanto, solo la capa exterior del concreto es la que mantiene el equilibrio con la humedad relativa exterior.⁷

El contenido de humedad es el factor que mas influye en la velocidad de corrosión. Si los poros contienen poca humedad (Figura 2.6.a), la resistividad es muy elevada y el proceso de la corrosión se encuentra muy dificultado. En estas condiciones, la velocidad de corrosión será baja a pesar de tratarse de un concreto carbonatado o contaminado por cloruros.⁷



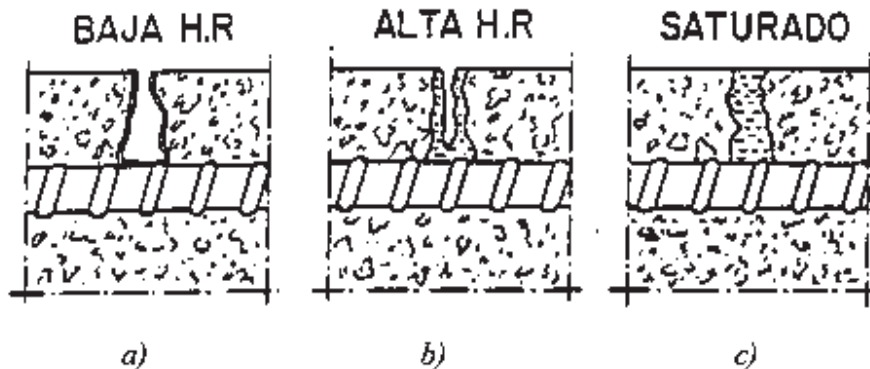


Figura 2.6. Contenido de humedad en los poros dependiendo de la humedad ambiental.

Si la humedad relativa es alta, pero no llega a saturar los poros, la velocidad de corrosión es elevada por que el oxígeno llega hasta la armadura y la resistividad es tan baja que da lugar a velocidades de corrosión máximas (Figura 2.6.b)⁷

La corrosión no se puede producir cuando el concreto esta totalmente seco por que no se puede desarrollar el proceso electroquímico. Tampoco si los poros están saturados de humedad (Figura 2.6.c). En este caso la resistividad será la menor posible y la pila de corrosión se vera favorecida, pero sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua y difundir a su vez para poder alcanzar la armadura dando lugar a velocidades de corrosión moderadas e incluso bajas.⁷

El contenido en agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la Humedad Relativa del ambiente. La humedad relevante, es decir, la que influye en los procesos de corrosión, es la realmente contenida en los poros. A este respecto, debe tenerse presente que la humedad ambiental y la del concreto solo coinciden en regímenes estacionarios y que en condiciones cambiantes es mayor la humedad del concreto, por que este pierde agua a mayor velocidad de lo que la gana a causa de la existencia de tensiones capilares.

Este ultimo fenómeno puede verse acrecentado cuando el concreto este contaminado por cloruros, a causa del carácter higroscópico de los mismos. Asimismo, aunque el ambiente exterior este seco, el interior del concreto no se seca mas que cuando tales circunstancias se prolongan largo tiempo. En la mayoría de los concretos, a partir de 3 a 4 centímetros del medio exterior, los poros siempre se encuentran saturados o casi saturados de humedad. Este comportamiento esta muy influenciado por la porosidad del concreto, ya que concretos muy porosos permitirán una respiración mas profunda que concretos mas densos, cuya piel sólo respirará en los 1 a 2 cm. mas externos.⁴





2.1.3.5. Efecto del Oxígeno.

No es posible que el efecto de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta aireación de las mismas.⁴

Durante mucho tiempo se ha considerado que el acceso o flujo de oxígeno es el factor determinante de la velocidad de corrosión. Así, se piensa a menudo que el espesor del recubrimiento influye mucho en el acceso de oxígeno y se han realizado múltiples trabajos para medir la permeabilidad del concreto al oxígeno, al aire o a los gases. Pero el estado actual de conocimiento descarta esta hipótesis, por lo que no son válidas las extrapolaciones al fenómeno de corrosión de las armaduras de los ensayos de permeabilidad del hormigón, cuando se utiliza la presión mecánica como fuerza impulsora de los gases.⁴

Si el flujo de oxígeno fuera el factor determinante de la velocidad de corrosión, sin duda esta debería ser mayor en un concreto seco, conservado por ejemplo en una atmósfera con un 50% de Humedad Relativa, que en un hormigón húmedo donde el flujo de oxígeno es menor, ya que este tiene que disolverse previamente en el agua contenida en los mismos. Sin embargo, la evidencia experimental muestra claramente que la velocidad de corrosión es máxima cuando los poros tienen suficiente agua, sin llegar a saturarse, como para facilitar los procesos de corrosión.⁴

Cuando el concreto tiene los poros completamente saturados de agua, el oxígeno se tiene que disolver en ella antes de alcanzar las cercanías de la armadura. En este caso el flujo de oxígeno es el factor controlante, ya que la cantidad que fluye es muy limitada. En todos los demás casos, el acceso de oxígeno siempre es suficiente para soportar la velocidad de corrosión que permita la resistividad del hormigón.⁴

Cuando el concreto es denso y el ambiente exterior contiene unos niveles medios de humedad, los poros están completamente saturados de agua a partir de los 3 a 4 centímetros del exterior. Por lo tanto, si existen armaduras más interiores y estas están despasivadas, su velocidad de corrosión estará limitada, pero si están más cerca de la superficie, su velocidad de corrosión puede ser muy elevada.⁴

Existen varios ensayos en los que se intenta correlacionar la mayor o menor permeabilidad del hormigón frente a los gases con su menor o mayor capacidad protectora en procesos de corrosión. Sin embargo, se ha demostrado que debido a que la corrosión es un proceso electroquímico, solo son válidos los valores de flujo de oxígeno cuando se miden utilizando fuerzas impulsoras de tipo electroquímico y no aquellas provenientes de fuerzas mecánicas.⁴

En la práctica, una aproximación gruesa, pero suficiente y no sofisticada, para conocer la mayor o menor bondad de un concreto en relación a su permeabilidad al oxígeno es medir su porosidad o índice de huecos accesibles.⁴





2.1.3.6. Efecto de la Temperatura.

La temperatura juega un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora la humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.⁴

Finalmente, es importante destacar que estos tres factores ambientales (humedad, oxígeno y temperatura) tienen efectos contrapuestos y que, por lo tanto, no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero a partir de uno solo. Esta característica del efecto inversor (por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso de oxígeno, o bien una mayor temperatura acelera la corrosión pero disminuye la condensación) lleva a múltiples predicciones erróneas de comportamiento de las armaduras.⁴

2.1.3.7. Estado Superficial del Acero.

Siendo la superficie del acero la primera interfase con el medio, es lógico pensar que su estado superficial afectara las reacciones que tendrían lugar en contacto con él. En términos generales, el acero cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformado ("mill scale") se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie está libre de dicha capa. No obstante, la presencia de productos de oxidación producidos por la corrosión atmosférica no necesariamente demuestra igual comportamiento, siendo incluso altamente probable que de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, se propicie la corrosión.⁴

Adicionalmente, los productos de corrosión presentes en forma masiva, no adherentes, deben ser eliminados, ya que ocasionan problemas de adherencia o condiciones propicias para la corrosión de la armadura en el concreto. Esto es particularmente crítico cuando se utiliza acero de alto límite elástico en concreto pre - y postensado. En estos casos la superficie del acero debe encontrarse limpia y cabe resaltar que no se aceptara reducción de sección, ya cualquier resto de óxido puede inducir grietas de corrosión bajo tensión a largo plazo.⁴

2.1.3.8. Tensiones Mecánicas del Acero.

Los aceros de pre-y postensado son de composición eutéctica (alrededor del 0.8% de C) y suelen estar sometidos a tensiones entre el 60 y 80% de su límite elástico. Estas elevadas tensiones no representan ningún riesgo si el acero está exento de imperfecciones y de óxidos superficiales y si el concreto que lo rodea es de elevada calidad.⁴





En el concreto donde la carbonatación alcance los alambres tensados o donde haya ciertos iones despasivantes, el riesgo de una corrosión bajo tensión existe. Este tipo de corrosión se caracteriza por incubar grietas no visibles al ojo humano, que se propagan con relativa rapidez hacia el interior. Alcanzada una pérdida de sección crítica, el alambre se rompe de forma frágil.⁴

No todos los concretos pre-o postensados que se deterioran lo hacen mediante este mecanismo que es relativamente inusual, la mayoría de los fallos es debida a una corrosión simple por cloruros o carbonatación.⁴

La única forma de confirmar el tipo de rotura es mediante el estudio microscópico de las superficies fracturadas.⁴

2.1.3.9. Corrientes Erráticas de Interferencia.

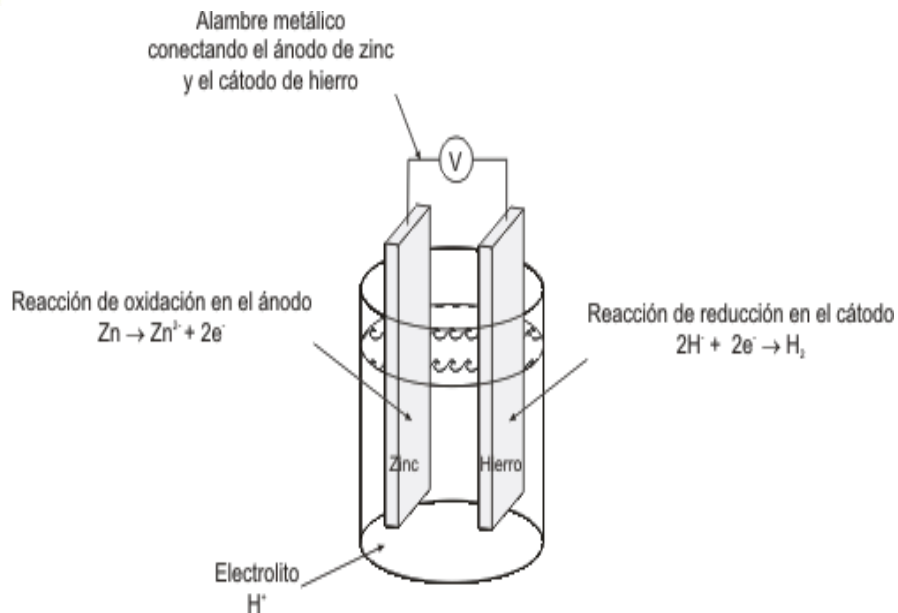
Como ya se menciona anteriormente, estas corrientes son aquellas que, por diversas causas, abandonan sus circuitos naturales para circular por el medio en el que se encuentran los conductores, siguiendo así caminos no previstos. En el caso de estructuras de concreto armado se ha demostrado que este efecto es importante para acelerar el proceso de corrosión ya iniciado por otros factores, como por ejemplo, concretos ya contaminados por iones cloruros o carbonatados.⁴

Por lo tanto, es importante tomar en cuenta este efecto en estructuras enterradas o sumergidas que son los lugares potencialmente factibles para que existan corrientes capaces de acelerar la corrosión de las armaduras. Esto induce a un rápido incremento en la disolución localizada del material, pudiendo llegar a ser un daño catastrófico.⁴

2.1.3.10. Contacto Galvanico entre dos Metales.

El contacto de las armaduras con otros metales no suele ocasionar su corrosión en ausencia de agentes desencadenantes. Sin embargo, deberá evitarse este contacto, pues podrían existir determinadas circunstancias que sitúen al acero en condiciones más favorables para la despasivación, si los otros metales lo polarizaran hacia potenciales más anódicos. En general, el contacto acero-inoxidable o acero-cobre no produce la corrosión. El contacto con zinc o aluminio puede ser incluso favorable ya que induce una cierta protección catódica a la armadura.⁴





2.1.3.11. Iones Despasivantes.

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.⁴

a. Cloruros.

Los cloruros inducen una destrucción local de la capa pasiva del acero, ocasionando un ataque localizado que frecuentemente se transforma en picaduras que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacio de tiempos relativamente cortos. Dependiendo de la extensión de la corrosión, puede aparecer o no la fisuración del recubrimiento. En zonas totalmente sumergidas las armaduras se pueden corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento. En estas zonas sumergidas o en el concreto completamente saturado, el ión cloruro penetra en el concreto por difusión. Sin embargo en las zonas aéreas de ambientes marinos o en las zonas afectadas por ciclos de hielo-deshielo (zonas en las que se han aplicado sales de deshielo) la absorción capilar puede ser un mecanismo de penetración más rápido.¹

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas: a) por que los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos); sin embargo, esta situación no es ya muy común pues desde hace tiempo la reglamentación en la materia prohíbe la inclusión de estos iones en el concreto, o b) por que penetren desde el exterior (que es el medio mas frecuente) al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.⁴





En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el amasado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables. En general los límites que se aceptan son distintos en varios países, tal como se muestra en la Tabla 2.1. Por ejemplo, en Europa y en muchos países latinoamericanos se admite para concreto armado 0.4% en base al contenido de cemento y para pretensado 0.2% en la misma base.⁴

Tabla 2.1. Valor crítico de los cloruros en concretos reforzados.⁴

País	Norma	Límite Máximo de Cl^-	Referido a:
USA	ACI 318	\leq A 0.15% en Ambiente de Cl	Cemento
USA	ACI 318	\leq a 0.3% en Ambiente Normal	Cemento
USA	ACI 318	\leq a 1% en Ambiente Seco	Cemento
Inglaterra	CP-110	\leq a 0.35% al menos en un 95%	Cemento
Australia	AS 3600	\leq al 0.22%	Cemento
Noruega	NS 3474	\leq al 0.6 %	Cemento
España	EH 91	\leq al 0.40%	Cemento
Europa	EUROCODIGO 2	\leq al 0.22%	Cemento
Japón	JSCE-SP 2	\leq al 0.6 Kg. / m ³	Concreto
Brasil	NBR 6118	\leq al 0.05%	Agua

Las divergencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos (su contenido de álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros.⁴

En relación a este límite máximo de cloruros es importante mencionar que parte de ellos se pueden combinar con las fases aluminicas o ferriticas de los cementos, por lo que solo son peligrosos los que quedan sin combinar o libres. La proporción entre libres y combinados tampoco es constante, al estar influida por la finura del cemento, su contenido en yeso, la temperatura durante el fraguado y la humedad de los poros del concreto.⁴

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos donde se hace uso de sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.⁴





Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior.

- El tiempo que tardan hasta llegar a la armadura.
- La proporción que induce a la despasivación.
- La velocidad de corrosión que provoca una vez desencadenada la corrosión.⁴

En cuanto al tiempo que tardan los cloruros en llegar a la armadura en una estructura ya construida, lo importante es averiguar a que profundidad han penetrado en el momento de hacer la inspección, ya que el recubrimiento de concreto debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar estos iones en el tiempo previsto de vida útil de la estructura.⁴

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo:⁴

$$X_{Cl^-} = K_{Cl^-} \sqrt{t}$$

X_{Cl^-} .- Profundidad alcanzada por una cierta porción de cloruros.

t .- Tiempo

K_{Cl^-} .- Constante dependiente del Concreto y del Medio.

Ello es debido a que, en general, tanto los procesos de difusión pura, como los de absorción capilar, siguen una ley potencial.⁴

El calculo riguroso de X es complejo debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del concreto, tipo de cemento, nivel de contaminación exterior, contenido en humedad del concreto, etc.) Una de las expresiones matemáticas que más se emplea para efectuar la predicción de la velocidad de penetración, o para ser ajustada a los perfiles de concentración de cloruros encontrados en las estructuras reales es la solución de la segunda Ley de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

que se conoce como la “ecuación de la función de error”.

$$C_x = C_s(1 - \operatorname{erf} \frac{X_{Cl^-}}{2\sqrt{D_{ap}t}})$$





- C_x = Concentración a la distancia x
C_s = Concentración Superficial.
X_{Cl⁻} = Profundidad alcanzada.
D_{ap} = Coeficiente aparente de Difusión.
t = Tiempo

Esta ecuación, aunque se utiliza muy ampliamente, es igualmente reconocida como de limitado uso con fines de predicción, dado el comportamiento no rigurosamente "de Fick" que presenta la penetración de cloruros en el concreto.

Para finalizar, cabe recalcar que una vez que el cloruro alcanza el nivel de la armadura, la corrosión se inicia hasta que se alcance una concentración crítica, que por otro lado no puede tomar un valor constante, ya que depende de varios factores como: tipo de cemento, relación agua/cemento, curado, compactación, contenido de agua en los poros, disponibilidad de oxígeno, etc. Esta multidependencia hace que no se pueda definir un valor único de Cl⁻ para iniciar la corrosión.¹

b. Sulfatos.

El ión sulfato (SO₄⁻²) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos. El contenido de sulfatos, por lo tanto, será expresado como concentración del anión SO₄⁻² en mg/L. Antes se acostumbraba a enjuiciar el riesgo de degradación basándose en el contenido de SO₃⁻² de los terrenos o de las aguas. La conversión del valor de SO₄⁻² a la forma SO₃⁻² se logra multiplicando por 0.83.⁴

El ión sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Pórtland son los amoniacos, cálcico, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásicos, cúprico y aluminico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos bórico y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto.⁴

La presencia de sulfatos en agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de degradación del concreto por lixiviación. De otro lado, la presencia de sulfatos puede ocasionar una reacción de cambio de base, en el curso de la cual el catión del sulfato será sustituido por Ca⁺², originándose la degradación del concreto por reacción de cambio iónico. En ciertas circunstancias puede ocurrir, sin embargo, que la presencia de sulfatos de lugar a una degradación por expansión debido a la formación de otros componentes estables en la masa endurecida del cemento.⁴





Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el anión sulfato del agua con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado por el cemento, el cual se deposita en los poros del concreto en donde se cristaliza con absorción de dos moléculas de agua. Este proceso de reacción química y cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del concreto -especialmente en los de las capas superficiales- y termina por lograr su desmoronamiento. Se ha indicado que este aumento de volumen es del 17.7%. Si existen además iones Mg^{++} , la formación de hidróxido magnésico produce un aumento de volumen de 19.6%, aproximadamente. ⁴

La degradación producida por los sulfatos es causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tri-cálcico del cemento. El C_3A reacciona – según se ha indicado anteriormente – con el yeso formado por el ion sulfato y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o con el yeso contenido en el agua selenitosa original, formándose un sulfoaluminato cálcico hidratado de gran complejidad y poco soluble. Este compuesto cristaliza absorbiendo 31 moléculas de agua y creando fuertes presiones internas, a causa de su aumento de volumen. Dicha sal compleja es llamada sal de Michaelis-Candlot-Deval, existente en la naturaleza y llamada etringita. Se debe indicar que la etringita solo se forma para determinados valores del pH. ⁴

Los cristales aciculares (“bacilos” del cemento) formados con absorción de agua de cristalización aumentan de volumen, de tal forma que el concreto se desmorona debido a la fuerte expansión desarrollada. ⁴

La formación de cristales aciculares, prácticamente reconocibles, empieza a tener lugar en concentraciones de 254 mg/L. Se forma gran cantidad de sulfoaluminato cálcico, especialmente cuando existen más de 1000 mg/L. ⁴

2.1.3.12. Carbonatación.

Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la base acuosa del concreto, reduciendo su pH dando lugar a una neutralización de todo el material. ⁴

El producto de la reacción mayoritario resultante de este proceso es el carbonato cálcico. Cuando estas condiciones del electrolito de los poros se alcanzan al nivel de la armadura, esta queda en unas condiciones electroquímicas que permiten su corrosión activa si las condiciones de humedad y temperatura lo permiten. ¹

La carbonatación es un proceso de difusión y, por lo tanto, su avance en el interior del concreto progresa atenuándose en el tiempo. La modelización de la carbonatación suele realizarse utilizando la expresión: ¹

$$X_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \sqrt{t}$$

Donde X es la profundidad carbonatada, V_{CO_2} representa una velocidad de carbonatación y t es el tiempo de exposición.





El factor V_{CO_2} dependerá fundamentalmente del tipo de concreto y de las características del ambiente. La carbonatación no se desarrolla si el concreto está saturado en agua o si está totalmente seco. Sin embargo, su avance será máximo cuando se produzcan ciclos de humectación/secado, que confiere al concreto un grado de saturación moderado.¹

La Figura 2.7 muestra el cambio abrupto de pH que se produce en el interior del hormigón y que es el que da lugar a la aparición de un "frente carbonatado", que se revela muy bien con el indicador de fenolftaleína.⁴

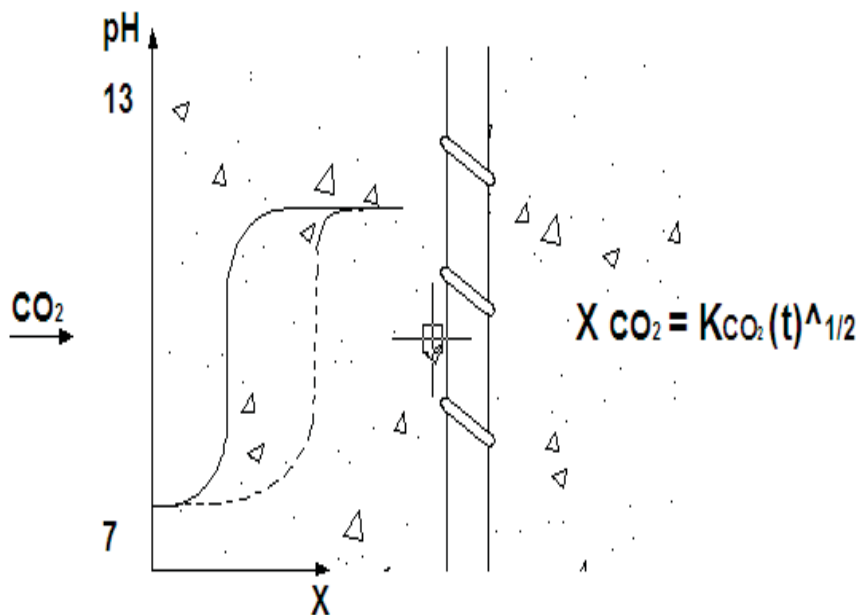


Figura 2.7. Variación del pH en el Hormigón debido a la Carbonatación.

Cuando ese frente llega hasta la armadura, esta se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH.⁴

La velocidad de avance de este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará este en llegar hasta la armadura. La velocidad de avance es función fundamentalmente de: a) el contenido en humedad del hormigón, b) su porosidad (relación agua-cemento) y c) su contenido en materia alcalina carbonatable.⁴

La porosidad del concreto es también un parámetro muy importante, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente saturados de humedad y por lo tanto inaccesibles a la carbonatación.⁴





Finalmente, el contenido de CaO y de alcalinos (sodio y potasio) son las materias susceptibles de carbonatarse. Cuando mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación, de ahí que los cementos Pórtland sin adiciones sean en general más resistentes a la carbonatación.⁴

Una vez carbonatado el concreto a la altura de las armaduras, si la humedad ambiental es más baja que 80%, la despasivación no dará lugar a velocidades de corrosión apreciables. Solo si la humedad es mayor del 80% (exteriores con temperaturas variables entre el día y la noche o a lo largo del año) se pueden alcanzar contenidos de humedad que den lugar a corrosiones apreciables.⁴

En general las velocidades de corrosión serán mucho menores que en el caso de los cloruros.⁴

Otra circunstancia favorable a tener en cuenta es que, al igual que en el caso de la corrosión atmosférica, la corrosión desencadenada por la carbonatación puede dar lugar a capas de herrumbre con características protectoras que atenúan la velocidad de corrosión subsecuente.⁴

Todo ello hace de la carbonatación un fenómeno mucho menos peligroso que la corrosión por cloruros.⁴

2.1.3.13. Lixiviación por Aguas Blandas.

La degradación del concreto no solo puede ser causada por agua que contenga sustancia agresivas, si no también por aguas totalmente puras, libres de sales, por aguas blandas que tengan pocas impurezas o por aguas de condensación industrial, aguas de fusión de glaciares, aguas de nieve, aguas de lluvia, aguas pantanosas blandas y algunas aguas procedentes de grandes profundidades. El concreto es rápidamente atacado por las aguas blandas agresivas, las cuales tienden a disolver el calcio de la estructura.⁴

La lixiviación del hidróxido de calcio del concreto, es decir, la reducción de su contenido de CaO, conduce, por lo tanto, a la reducción de los restantes componentes del concreto, silicatos, aluminatos y ferritos hidratados; como consecuencia, el concreto pierde su resistencia y se desmorona. Las combinaciones anteriormente citadas solo son estables mientras que la concentración del Ca (OH)₂ del agua del cemento sea superior a un cierto valor que recibe el nombre de concentración límite o umbral. Los concretos de cemento Pórtland son atacados fuertemente y destruidos cuando el contenido de CaO del cemento, determinado analíticamente, se reduce en más de un 20% como resultado de la lixiviación. Este fenómeno permite que el acero de refuerzo se corroa, ya que pierde su película pasiva al exponerse directamente al ambiente por el desmoronamiento del concreto y la reducción de su alcalinidad.⁴





La solubilidad del hidróxido cálcico es modificada en forma considerable por la presencia de otras sales en la disolución; algunos iones la reducen, pero otros (por ejemplo, el ion sodio y el ion cloruro) la acrecientan. T. Thorvaldson llama la atención sobre el hecho de que, al contrario de lo que sucede con los cloruros alcalinos, al cloruro cálcico dificulta la disolución de la cal, pues el hidróxido cálcico y el cloruro cálcico poseen un catión común. En general, las sales cálcicas dificultan la acción disolvente, mientras que las sales alcalinas aumentan la velocidad de disolución. En pequeñas cantidades, también el ion Mg causa una reducción de la disolución, pues parte del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la capa superficial se transforma en $\text{Mg}(\text{OH})_2$, que precipita disminuyendo la permeabilidad del concreto.⁴

El signo externo del principio de la destrucción del concreto por lixiviación o por circulación por líquidos agresivos es el desprendimiento de la cal, que toma la forma de eflorescencias gradualmente crecientes en la superficie del concreto, especialmente en la proximidad de deficientes enlaces estructurales, grietas imprevistas, coqueras, así como en la zona de las oscilaciones del nivel de la capa acuífera.⁴

La filtración y la lixiviación de un concreto pueden ser evitadas o dificultadas por aumento de su compacidad, mediante tratamientos superficiales o por impermeabilización.⁴

2.1.3.14. Presencia de Coqueras en Contacto con Armaduras.

Las discontinuidades producidas por la formación de coqueras interiores hacen que haya zonas de la armadura sometida a la elevada humedad del interior del concreto, pero sin estar en contacto con alcalinidad alguna. Estas zonas se corroerán de la misma forma que si estuvieran sometidas a una atmósfera de elevada humedad.⁴

2.1.3.15. Existencia de Fisuras.

Las grietas que aparecen en el concreto son un rápido camino para la penetración de los agentes agresivos hasta la armadura. Cuando estos agentes agresivos entran por la fisura y alcanzan la armadura, se empieza a corroer la zona no recubierta de concreto que actúa como ánodo frente a las adyacentes que se comporta como cátodo (Figura 2.8).⁷



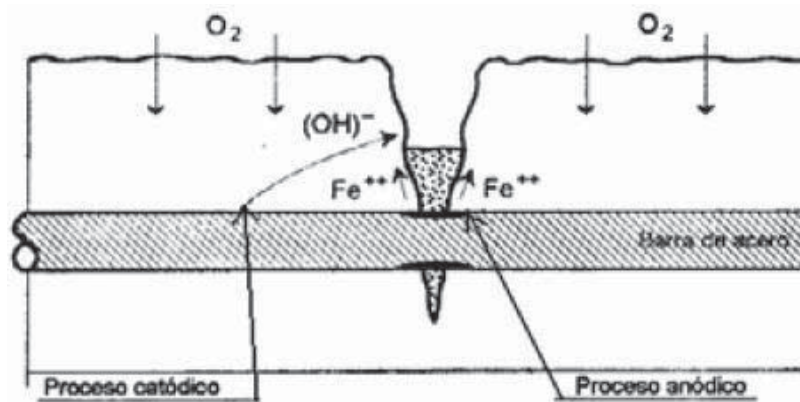


Figura 2.8. Corrosión por Fisuras Transversales⁷

Las fisuras pueden ser transversales y longitudinales, siendo estas últimas mucho más perjudiciales porque abarcan mayor superficie de acción.⁷

Las fisuras estructurales (transversales a la armadura) pueden constituir en principio un camino rápido de llegada de los agresivos hasta la misma, dependiendo de su abertura.⁴

Las fisuras del concreto, originadas por sollicitaciones mecánicas sobre la estructura, se disponen, en general, en planos ortogonales a las armaduras principales, puesto que estas se colocan precisamente para absorber las tensiones de tracción que el concreto por si solo no puede soportar. Sin embargo, limitar la deformación en tracción del acero para que no supere la de rotura en tracción del concreto y así evitar las fisuras transversales, supone un desperdicio económicamente inaceptable de la capacidad de las armaduras.⁴

Las fisuras que acompañan las armaduras en su misma dirección son, en general, resultantes de un proceso de corrosión ya iniciado. Pueden sin embargo, aparecer también por procedimientos constructivos incorrectos, como por una retracción del fraguado en ciertas condiciones, estribos con muy bajos rendimientos, estados tensionales de compresión elevados por efecto del modulo de Poisson.⁴

La abertura máxima de fisuras se limita, entre otras exigencias, por la durabilidad de la armadura. Los códigos suelen limitar el ancho de fisura a valores entre 0.1 y 0.4 mm.⁴

La incidencia de la abertura de la fisura en la corrosión de la armadura depende de factores como:⁴

- La agresividad del medio ambiente
- El recubrimiento de la armadura
- La calidad del concreto.





En la actualidad existe la tendencia a considerar que la mayor o menor agresividad no depende del tamaño de la abertura como tal, si no que se piensa que por debajo de un determinado valor de la abertura de la fisura (entre 0.3 y 0.4 mm), esta no incrementa el riesgo de un ataque.⁴

La tendencia actual en relación a la abertura máxima de fisuras para estructuras de concreto armado es pues, acortarla por el valor de 0.4 mm al considerarse que por debajo de ese valor el riesgo de ataque no se incrementa. Igualmente se limita indirectamente la abertura por recomendaciones constructivas: recubrimiento de la armadura, diámetros y espaciamientos entre barras y calidad del concreto (agua / cemento, adiciones).⁴

En cuanto a las fisuras longitudinales debidas a asentamientos tradicionales del concreto o a retracción plástica, se puede considerar que se comportaran, en cuanto a la durabilidad, de forma más agresiva que las transversales, dado que el área de armadura expuesta al ataque es mayor en las fisuras longitudinales.⁴

2.1.4. EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

El acero en el concreto se encuentra usualmente en condición pasiva, no corroído. Sin embargo, el concreto reforzado con acero es frecuentemente utilizado en ambientes severos donde esta presente el agua de mar o sales de deshielo. Cuando los cloruros se mueven dentro del concreto, provocan la ruptura de la capa pasiva de protección del acero, causando que este se oxide y se deslamine.

La corrosión de los refuerzos del concreto reforzado da lugar a síntomas visibles en forma de manchas de oxido, grietas del recubrimiento de concreto y desprendimientos del mismo. En algunas circunstancias, sin embargo, pueden ocurrir deslaminaciones en elementos estructurales sin ningún signo previo de deterioro en la superficie.²

Como consecuencia de la corrosión se produce incremento del volumen de las armaduras provocando la aparición de elevadas tensiones que dan lugar a la fisuración del concreto. Este deterioro del concreto hace que al continuar el fenómeno de la corrosión los agentes agresivos penetren en el interior del mismo con mayor facilidad.⁷

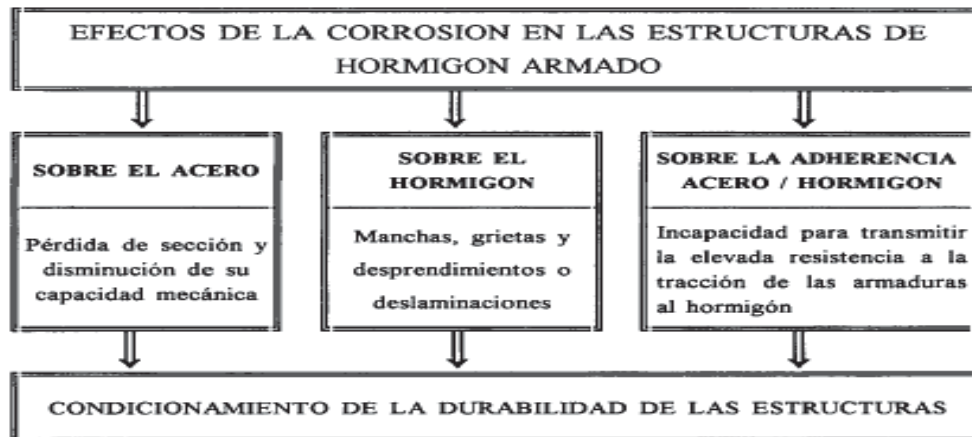
Con frecuencia, debido a la pequeña resistencia del concreto a la tracción, se acaba produciendo una fisuración del recubrimiento, que discurre longitudinalmente paralela a las armaduras corroídas. Si no se detiene el proceso, puede saltar todo el recubrimiento, dejando al descubierto las armaduras.²

Los efectos de la corrosión, en resumen, se manifiestan en las tres vertientes consideradas en el esquema de la Figura 2.9; siguientes: sobre el acero, sobre el concreto y sobre la adherencia acero/concreto; llevando todas a condicionamientos de la durabilidad de las estructuras:²





Figura 2.9. Efectos y Síntomas Visibles de la Corrosión en Estructuras de Concreto Armado



La acumulación de todos los efectos de la corrosión es la principal causa de deterioro de las armaduras de concreto reforzado y la que limita, por lo tanto, su durabilidad. No existe un límite máximo tolerable de corrosión, que pueda variar según la finalidad de las estructuras, ni un índice numérico de aceptación general para el cálculo de durabilidades, pues se estiman con relación a distintos parámetros: la adherencia entre el concreto y las armaduras, la pérdida de capacidad portante, la reducción de sección en las armaduras, el tiempo necesario para que las sustancias agresivas del medio penetren hasta las armaduras, incluso, la sintomatología visible de deterioro. En cualquier caso, sea cual sea el parámetro elegido para la estimación, son siempre los efectos de la corrosión la causa de variación de dicho parámetro. Desde hace tiempo, la corrosión de las armaduras es un aspecto al que se le concede la mayor importancia en el mantenimiento de las estructuras existentes, porque ha contribuido a colapsos estructurales de amplísima repercusión.²

2.1.5. MÉTODOS DE PROTECCIÓN, CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN.

Como se mencionó con anterioridad, y cabe recalcar con tenacidad, el acero embebido en el concreto se encuentra protegido frente a la corrosión mediante su pasivación. La razón de esta pasivación de la armadura es debida a la alta alcalinidad del electrolito de los poros, básicamente constituidos por KOH, NaOH y Ca (OH)₂, alcanzando valores de pH entre 12.6 y 14. Esta elevada alcalinidad de la fase acuosa de los poros del concreto favorece a la formación de una capa de óxidos microscópica y transparente, que la protege de su disolución anódica y la mantiene inalterada por el tiempo indefinido mientras no cambien las condiciones de servicio. Por otro lado, el recubrimiento del concreto se comporta como una barrera física que aísla a la armadura del ambiente agresivo exterior.¹





La armadura debe estar embebida en el concreto de acuerdo con la normativa existente. En particular el diseño de la mezcla y el recubrimiento mínimo debe tenerse en cuenta y ser adecuado a la corrosividad del ambiente. En muchos casos estas medidas serán suficientes para proteger la armadura, siempre que el concreto sea correctamente colocado, compactado y curado.

La pérdida de durabilidad en el concreto armado ocurre únicamente si la capa de óxidos pasivantes se vuelve inestable debido, generalmente, a la penetración de los agresivos del ambiente exterior a través de la red de poros.¹

Para asegurar una durabilidad adecuada a las estructuras de Concreto Reforzado resultan decisivos la calidad y espesor de recubrimiento del concreto, ya que es la única barrera para un medio ambiente siempre agresivo para el acero. En medios poco agresivos, si se respetan las exigencias de un código de buena practica, la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado queda asegurada. Sin embargo, siempre existen ambientes lo suficientemente agresivos para provocar el desencadenamiento de la corrosión y así no se alcance la vida en servicio prevista en el proyecto de la estructura.²

En estos casos es necesario acudir a métodos de protección complementarios de las armaduras. Los métodos mas utilizados hasta el momento se presentaran a continuación, donde se exponen también su campo de aplicación y sus ventajas y desventajas.²

PROTECCIÓN DE LAS ARMADURAS					
MÉTODOS QUE ACTÚAN SOBRE EL ACERO			MÉTODOS QUE ACTÚAN SOBRE EL CONCRETO		
	Protección Catódica	- Recubrimientos Metálicos. - Galvanizado.	Pinturas Epoxi	Aditivos inhibidores	Pinturas Epoxi, Ceras, etc.
CAMPO DE APLICACIÓN PRINCIPAL	Cualquiera	- Ataque por agua de mar. - Carbonatación.	Cualquiera	- Ataque por Cl- añadidos durante el Amasado - Carbonatación	Cualquiera
VENTAJAS	Única y eficaz en Corrosión ya Iniciada	- Facilidad de aplicación. - Costo Relativo - Sin Mantenimiento	Sin Mantenimiento	- Sin Mantenimiento - Fácil de aplicación - Costo Relativo	Protegen a la vez al Concreto
DESVENTAJAS	- Personal calificado - Control continuo	Deterioros Locales por manipulación y mantenimiento	Costo Elevado en la puesta en Obra	Uso de una dosis Optima	- Costo Relativo - Necesidad de mantenimiento.





Los métodos de protección y control de la corrosión se basan en eliminar alguno de los 4 elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). A continuación se detallarán algunos de estos métodos que van desde los más sencillos hasta los que a la fecha aun se encuentran en investigación.

2.1.5.1. Elección del material.

La primera idea es escoger todo un material que no se corroa en el ambiente considerado. Se pueden utilizar aceros inoxidables, aluminios, cerámicas, polímeros (plásticos), etc. La elección también debe tomar en cuenta las restricciones de la aplicación (masa de la pieza, resistencia a la deformación, al calor, capacidad de conducir la electricidad, etc.).

Cabe recordar que no existen materiales absolutamente inoxidables; hasta el aluminio se puede corroer.³

2.1.5.2. Concepción de la pieza.

En la concepción, hay que evitar las zonas de confinamiento, los contactos entre materiales diferentes y las heterogeneidades en general.³

Hay que prever también la importancia de la corrosión y el tiempo en el que habrá que cambiar la pieza (mantenimiento preventivo).³

2.1.5.3. Dominio del ambiente.

Cuando se trabaja en ambiente cerrado (por ejemplo, un circuito cerrado de agua), se pueden dominar los parámetros que influyen en la corrosión; composición química (particularmente la acidez), temperatura, presión. Se puede agregar productos llamados "inhibidores de corrosión". Un inhibidor de corrosión es una sustancia que, añadida a un determinado medio, reduce de manera significativa la velocidad de corrosión. Las sustancias utilizadas dependen tanto del metal a proteger como del medio, y un inhibidor que funciona bien en un determinado sistema puede incluso acelerar la corrosión en otro sistema.³

Sin embargo, este tipo de solución es inaplicable cuando se trabaja en medio abierto (atmósfera, mar, cuenca en contacto con el medio natural, circuito abierto, etc.)³





2.1.5.4. Aislamiento del medio.

Existen distintos medios para impedir que ocurra la reacción química. Como primera medida de protección se puede aislar la pieza del ambiente, dándole una mano de pintura, cubriendo la pieza de plástico, haciendo un tratamiento de superficie (por ejemplo, nitruración, cromatación o proyección plasma).³

2.1.5.5. Galvanoplastia.

La pieza se puede recubrir con una película de otro metal electrodepositado cuyo potencial de reducción es más estable que el alma de la pieza. Galvanoplastia existe como el niquelado, el zincado (galvanizado), el cobrizado y el cromatizado.³

El cromado usado comúnmente en la industria automotriz y en la de los fittings confiere una protección estable al alma de hierro con la cual se confecciona el artículo. El cromado (no confundir el cromado, un depósito de cromo, con la cromatación, que es la formación de una capa de metal combinado con iones de cromo VI). En efecto, el cromo mismo no se corroe, protegiendo así la pieza, pero la mínima ralladura es catastrófica, pues la pieza hace entonces las veces de ánodo sacrificial del cromo y se corroe a gran velocidad.³

Las pinturas anticorrosión con plomo han sido abandonadas a causa de su impacto dramático en el ambiente.³

2.1.5.6. Exposición a soluciones reductoras.

La superficie es expuesta a la permanente exposición de elementos químicos disueltos en una solución a bajas concentraciones, dichas especies son pares reductores que se oxidan ellos mismos a cambio de la pieza y además contribuyen con la pasivación o inactivación de la superficie formando micropelículas químicas estables. Estas especies se encuentran comúnmente en anticongelantes, pinturas base acuosa y otras aplicaciones.³

2.1.5.7. Morteros de Reparación.

Son materiales constituidos por una mezcla de agregado fino seleccionado y un aglomerante cementante que puede ser de base cemento Portland u orgánica (acrílicos, epóxicos, poliuretanos u otro polímero orgánico). A estos morteros se le puede agregar algunos aditivos (microsilica, ceniza volante, fibra sintética, escoria de alto horno, etc.).⁴





En general, los materiales basados en resinas se prefieren cuando las secciones a reparar son delgadas y en el caso de reparaciones grandes es preferible utilizar materiales en base a cemento Pórtland. Sin embargo al ser utilizados en concreto contaminados con iones cloruro, esta reparación puede agravar el problema creando problemas locales de corrosión. Esto es, si se utiliza material polimérico aislante se crearía una celda diferencial de oxígeno, donde el acero por debajo de la reparación, actuaría como ánodo, ya que es la zona donde no llegaría el oxígeno. Si se repara con morteros cementicios, se restablecería la película pasiva en el acero debajo de la reparación, el cual actuaría como cátodo, siendo entonces el acero que esta alrededor de la reparación el que actué como ánodo (Activo), acelerándose su corrosión por la formación de una celda galvanica.⁴

2.1.5.8. Revestimientos.

Estos, al igual que los anteriores, son aplicados sobre el concreto y actúan principalmente como barrera física. Entre ellos se pueden incluir:⁴

- **Revestimientos Hidrófugos:** son materiales a base de silicona que no solo repelen la humedad y resisten el desgaste, si no que permiten al sustrato respirar fácilmente. Al aplicarse sobre la superficie la penetran impregnándose en ella.
- **Membranas Orgánicas Prefabricadas:** son usadas para colocarse sobre la superficie del concreto de manera temporal o permanente,
- **Polímeros Impregnados sobre el Concreto:** son aplicados como mezcla reaccionante (manómetro + catalizador) sobre una superficie de concreto reforzado previamente deshidratado, la cual penetran considerablemente (aprox. 1 a 3 cm.), polimerizando luego y sellando los poros.
- **Otros Revestimientos:** son aplicados sobre el concreto en forma líquida, formando una película protectora. Han sido eficaces para retardar/evitar la carbonatación y a la vez son los responsables de presentar buena apariencia necesaria de las edificaciones. Entre los mas importantes son los epóxicos, acrílicos y poliuretanos. Es bueno destacar que los productos emulsionados con agua llamados comúnmente látex, a base de acrílicos y muy usados a nivel domestico, no son eficaces. Se utilizan distintos tipos, siendo los mas efectivos los barnices, como los acrílicos u poliuretanos alifáticos. Para protección con pinturas convencionales, esta extendido el uso de vinílicos, epóxicos y poliuretanos, entre otros.⁴





2.1.5.9. Extracción de los Iones Cloruros.

Esta es una técnica electroquímica, actualmente en desarrollo, donde se aplica un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ion cloruro para ser atraído por un ánodo colocado externo a la superficie de la estructura tratada. En la protección catódica propiamente este efecto se lograría también, pero a largo plazo. La remoción de la mayor parte del cloruro libre y la producción de OH^- permite restablecer la pasivación de la armadura.⁴

2.1.5.10. Realcalinización.

Como el anterior, este es un proceso que todavía se encuentra en desarrollo. Es un tratamiento temporal que incrementa el pH de la solución acuosa. Este proceso repasa la armadura debido a las reacciones electroquímicas que ocurrirían en la superficie. Esta técnica puede ser utilizada para el caso de concretos carbonatados.⁴

La técnica involucra el paso de una corriente, a través del concreto, hacia el acero, por medio de un ánodo colocado externamente sobre la superficie del concreto. Al igual que en la protección catódica se utiliza una fuente de energía de corriente continua, lográndose realcalinizar el concreto mediante varios mecanismos, siendo los más importantes: la electrolisis en los electrodos (alrededor de la armadura cátodo), se generan los iones OH^- por electrolisis del agua y reducción del O_2) y electroósmosis, movimiento del electrolito en el concreto hacia el cátodo. Los hidróxidos de sodio y de calcio son generalmente utilizados como electrolitos cubriendo el concreto y, al penetrar prevendrían posibles decrecimientos del pH, atrapando el CO_2 que pudiese ingresar desde el exterior.⁴

2.1.5.11. Protección contra la Corrosión en Medios Agresivos.

a. Protección Catódica.

La protección catódica (PC) de las estructuras de concreto reforzado es una aplicación relativamente nueva de un método de protección antiguo y aunque los conceptos básicos son simples, su aplicación práctica es más compleja, especialmente cuando se trata de utilizar en el concreto reforzado, debido a que los pequeños recubrimientos de concreto plantean serios problemas para lograr una distribución uniforme de la corriente de protección, exigiendo la intervención de personal especializado.²

Este es el único sistema de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la armadura se comporte como cátodo, por lo que se ha demostrado su gran utilidad en estructuras de concreto reforzado existentes, aun cuando en los últimos años se ha estado aplicando en estructuras nuevas.





En la práctica, en general por razones técnicas y económicas, no se llega a detener la corrosión sino a alcanzar una disminución que garantice el tiempo de servicio. Actualmente existen normas europeas y norteamericanas que dan instrucciones sobre la aplicación de este sistema de control de corrosión en el concreto reforzado. En todo caso, es imprescindible que todo el acero de refuerzo tenga buena continuidad eléctrica para que la protección catódica sea efectiva.⁴

La protección catódica se puede aplicar por “ánodos de sacrificio” o por corriente impresa, siendo este último el más utilizado a nivel mundial. La aplicación por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como ánodo. Se coloca una pieza (a menudo de zinc o que sea más activo que el acero) que se va a corroer en lugar de la pieza que se quiere proteger; la reacción química entre el ambiente y la pieza sacrificada impide la reacción entre el ambiente y la pieza útil. Resultados de laboratorio y a escala piloto en campo han demostrado efectividad en el uso de ánodos de aluminio y cinc. Este último ha sido aplicado en diferentes pilotes en campo con resultados satisfactorios. También se ha utilizado para protección de tuberías de concreto reforzado y pretensado, en suelos de baja resistividad.⁴

En el caso de corriente impresa el ánodo podría ser cualquier material, ya que se utiliza una fuente de energía de corriente continua para inducir corriente que entra en la estructura a proteger, haciéndola cátodo. Sin embargo, en el caso de la protección del acero en concreto en estructuras aéreas, es necesario el uso de materiales (que van a actuar como ánodos) que no produzcan deterioro del concreto, por lo cual deberían ser inertes o con muy bajas velocidades de oxidación.

Pero, aún a falta de un criterio ampliamente aceptado sobre la protección Catódica del acero en el concreto, las estructuras de concreto reforzado se protegen catódicamente con éxito, siendo la única técnica de protección capaz de detener la corrosión una vez desencadenada, por ejemplo en concretos carbonatados o fuertemente contaminados con cloruros. A esta conclusión llega la FHWA (Federal Highway Administración, USA) al estudiar diferentes procedimientos de protección como alternativas de la Protección Catódica, cuando afirma que: **“la única técnica de rehabilitación que se ha mostrado capaz de detener la corrosión de los tableros de puente, cualquiera que sea el contenido de cloruros en el concreto, es la Protección Catódica”**.²



**b. Galvanización de las Armaduras.**

Desde la primera galvanización práctica del galvanizado por inmersión para proteger las armaduras, ya en 1931, se ha recurrido frecuentemente a él bajo el supuesto de que la superior resistencia del cinc a los cloruros, en comparación con el acero, y al menor volumen de sus productos de corrosión, podrían retrasar considerablemente el deterioro de las armaduras de Concreto Reforzado en ambientes especialmente agresivos, encontrando tanto convencidos partidarios, como detractores. Las principales cuestiones, que conducen a estado de confusión son:²

- a. Si la protección complementaria proporcionada por el recubrimiento de cinc es suficiente en concretos fuertemente contaminados con cloruros.
- b. Si el cinc es estable en un medio de alcalinidad tan elevada como el concreto.
- c. El posible riesgo de fragilización de las armaduras por el hidrógeno desprendido durante las primeras horas de contacto entre el galvanizado y el concreto.
- d. Si la adherencia entre el concreto y los refuerzos resulta perjudicada por el galvanizado y si permanece por encima de las exigencias establecidas en las normas.²

El galvanizado resulta mucho menos susceptible a la carbonatación del concreto que el acero y podría resultar interesante su aplicación, incluso desde el punto de vista estético, en concretos de baja calidad, rápidamente carbonatados, ya que retardaría mucho la aparición de manchas de óxidos de hierro y el comienzo del periodo de propagación.²

En cambio, en ambientes con muchos cloruros todo parece indicar que la protección complementaria del galvanizado solo representa un pequeño retardo en la aparición de la sintomatología visible de la corrosión. Tanto en el acero desnudo como en el galvanizado se disparan las i_{corr} al crecer el contenido en cloruros y, si bien el umbral de cloruros soportado por el galvanizado es más alto, se llega, en concretos húmedos, a $i_{\text{corr}} \geq 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ al sobrepasarlo, lo que representa, para espesores normales en los galvanizados por inmersión, un aplazamiento de la corrosión del acero de tan solo 4 o 5 años.²

c. Recubrimientos con Resinas Epoxi.

Los recubrimientos de las armaduras con pinturas epoxi se han extendido considerablemente en USA, aprovechando su excelente adherencia al concreto y al acero y a su escasa permeabilidad a los cloruros. Como contrapartida puede señalarse su precio, relativamente elevado, su propia durabilidad en el concreto y la falta de experiencia en cuanto a resultados de muy larga duración.²





Los ensayos acelerados de la corrosión, en pares galvanicos formados por armaduras desnudas y protegidas con pinturas epoxi, demuestran que cualquier corrosión desarrollada en los defectos es varias ordenes de magnitud menor que la que afecta a las armaduras desnudas expuestas a las mismas condiciones. Sin embargo también ha sido observada una corrosión extensiva de las armaduras con pinturas epoxi en subestructuras de puentes en el ambiente marino subtropical de Florida. La corrosión se había propagado en menos de 10 años, acompañada por pérdida de adherencia de la pintura en las áreas adyacentes a los defectos, formación de grandes picaduras en el sustrato de acero y por deslaminaciones del recubrimiento de concreto.²

Sería necesaria mayor experiencia antes de pronunciarse definitivamente sobre la eficacia protectora de los recubrimientos epoxi en condiciones de servicio especialmente adversas.

El concreto armado es hoy en día uno de los principales materiales empleados en las realizaciones arquitectónicas y en estructuras de ingeniería civil. En los últimos años, los temas relacionados con la duración a largo plazo de muchas de estas estructuras han cobrado una especial importancia, sobre todo cuando muchas de ellas, proyectadas hace algunas décadas, comienzan a necesitar la aplicación de medidas de reparación o de sustitución de algunos elementos.¹

El acero embebido en el concreto se encuentra, por lo general, pasivado y libre de corrosión, por diversas razones, y que de forma simplificada, están relacionadas con el elevado nivel del pH y de la alcalinidad que proporciona el concreto.¹

El deterioro prematuro que experimentan las armaduras embebidas en el concreto esta relacionado, fundamentalmente, con la presencia de agentes agresivos tales como cloruros, los procesos de degradación del concreto, como es la carbonatación, y diversos ataques electroquímicos.¹

A esta situación, el recubrimiento de las armaduras con epoxi es una medida alternativa para proteger estas de la corrosión.¹



**Tabla 2.2.** Sistemas más comunes de protección contra la corrosión. ¹

Sistema de Protección	Descripción
Materiales para las armaduras y recubrimientos	Recubrimientos con epoxi Galvanización Acero inoxidable y revestimientos con acero inoxidable Composites
Aditivos y dosificación del concreto	Inhibidores Hormigón de altas prestaciones Bajas relaciones agua/cemento Microsilíce
Membranas, sellados y capas superficiales	Silanos/siloxanos Látex modificado Revestimientos con concretos densos y mejorados con microsilíce Membranas impermeables
Procesos electroquímicos	Protección catódica Eliminación electroquímica de cloruros
Medidas de Conservación	Empleo de fundentes no corrosivos Reparación de grietas y fisuras Lavado de tableros de puentes Mantenimiento de la juntas y de los sistemas de drenaje
Detalles del Proyecto	Recubrimientos de las armaduras Espesor de tablero, en puentes Sistemas de drenaje de las juntas
Condiciones de ejecución	Curado del concreto Control de la temperatura Control de ejecución
Combinaciones de las alternativas anteriores	

Predicción y Vida de Servicio.

Quizás el aspecto más subjetivo, y también más importante, para llevar a cabo un análisis de coste de ciclo de vida sea la estimación de la vida de servicio de una estructura, y la prolongación que puede experimentar la misma mediante la utilización de un sistema de protección contra la corrosión. El periodo de tiempo hasta la reparación es una de las decisiones más críticas a la hora de seleccionar el procedimiento de protección a utilizar, y por lo general es el que mayor impacto tiene en el análisis de coste de ciclo de vida. ¹

Soluciones para la Protección contra la Corrosión.

La solución del problema de la corrosión de las armaduras es, teóricamente, muy simple. Basta con:

- Emplear materiales resistentes a la corrosión
- Inhibir el concreto.
- Prevenir que los agentes que producen la corrosión alcancen el acero de las armaduras
- Mantener el potencial de acero en un nivel de protección.





Pondríamos llegar a afirmar que todos los procedimientos y materiales utilizados para combatir el problema de la corrosión de las armaduras se centran alrededor de, al menos, una de estas soluciones.¹

Proceso de recubrimiento de las armaduras con EPOXI.

Los requisitos para recubrir correctamente una armadura son pocos en número, pero difíciles de conseguir.

El recubrimiento debe:

- Envolver toda la superficie de la armadura, garantizando una película continua y uniforme.
- Ser resistente y mostrar una buena adherencia con el soporte para resistir las operaciones normales de transporte y manipulación en obra.
- Disponer de la flexibilidad suficiente para cumplir con las especificaciones de doblado.
- Ser resistentes a los álcalis.
- Ser económico y fácilmente aplicable.

Existen diversas técnicas para la aplicación de los recubrimientos con Epoxi fundido (FBE - Fusion Bonded Epoxi): aplicación electrolítica, inmersión y pulverización. El método habitualmente utilizado para el tratamiento de barras corrugadas rectas es el primero. Su aplicación es bastante simple y consta de las siguientes fases: limpieza de la barra, calentamiento de esta hasta alcanzar la temperatura adecuada (entre 190 y 240°C), aplicación del epoxi en forma de polvo, periodo de curado y endurecimiento del recubrimiento, e inspección final del resultado obtenido.¹

La preparación de la superficie de la barra es una de las fases más importantes, y de ella dependerá la buena adherencia de la película formada. Para ello, debe eliminarse de la superficie de las barras cualquier resto de suciedad, óxido o cascarilla no adherida, lo cual se consigue a través de un proceso de granallado con arena metálica, que permite obtener una superficie rugosa con unas protuberancias del orden de las 50 micras.¹



Fotografía 2.1. Proceso de Aplicación del recubrimiento Epoxi Fundido (FBE).¹





Tras esta operación, la barra se calienta por inducción hasta alcanzar la temperatura adecuada, momento a partir del cual atraviesa una nube de polvo cargada electrostáticamente, produciéndose la atracción de partículas que se funden, se unen, fraguan y curan formando una capa inerte, termosellada y resistente a la abrasión, que presenta además un elevado nivel de adherencia con el soporte.

El proceso finaliza con una inspección visual del resultado final, y un control eléctrico que permite determinar la uniformidad de la película formada, cuyo espesor debe estar comprendido entre 250 y 300 micras.¹

A pesar de que el procedimiento es extremadamente sencillo, es importante controlar los detalles y aplicarlos correctamente para conseguir un recubrimiento de calidad que sea capaz de prolongar la vida de servicio de las estructuras ubicadas en ambientes corrosivos.¹

El sistema FBE es ideal para conseguir un perfecto recubrimiento de la superficie de las barras corrugadas, caracterizada por la irregularidad de su superficie. El depósito electrostático, así como el control de la fusión y del flujo aseguran la formación de un revestimiento uniforme tanto en las superficies planas como rugosas.¹

El revestimiento es muy flexible, de manera que la barra puede ser transformada en las distintas formas requeridas por el armado sin sufrir daños. Cientos de obras realizadas ponen de manifiesto la dureza y resistencia al impacto de estos recubrimientos.¹

Para tener una idea de las principales características de este tipo de recubrimientos y la forma para evaluarlas, en la Tabla 2.3 se recogen las características de uno de estos productos, en concreto el Scotchkote 413 de 3M.¹





Tabla 2.3. Características del recubrimiento FEB Scotchkote 413 de 3M.

Propiedad	Descripción	Resultado
Resistencia al impacto	ASTM G 14 ASTM A 775/A 775 M	1.8 kg.m 0.9 kg.m
Resistencia a la abrasión	ASTM D 4060	< 0.008 g.
Penetración	ASTM G 17 (-40 a 160 °C)	0
Dureza	Dureza Knoop	≥ 16
Desprendimiento Cático	ASTM A 775/A 775 M ASTM G 18 1.5 V, 3% NaCl, 168 horas a 24°C con un defecto de 3mm.	2.7mm
Resistencia a la niebla salina	ASTM A 775/A 775 M ASTM B 117.5 % NaCl, 800 horas a 36°C con un defecto de 3mm	0.89 mm de radio medio de despre- ndimiento.
Permeabilidad a cloruros.	FHWA-RD-74-18, 45 días a 24°C.	Concentración de cloruros <2.24*10 ⁻⁵ moles/l
Resistencia química	ASTM A 775/A 775 M 45 días a 21 °C, 25% de CaCl, 10.7% NaOH, y saturado en Ca(OH) ₂	Sin rastro de am- pollas, peladuras y fisuración.
Trabajabilidad	ASTM A 775/A 775 M Doblado a 180° de una barra #5 sobre mandril de 79.5 mm a 22°C	Sin roturas ni fisuras
	ASTM A 775/A 775 M Doblado a 180° de una barra #19 sobre mandril de 152.4 mm a 22°C	Sin roturas ni fisuras

Por último, cabe recalcar, que en aquellos casos en los que se hubiera producido un deterioro de recubrimiento, causado por la manipulación de los elementos, golpes o procesos de soldadura, este puede ser fácilmente reparado mediante la aplicación de un retoque bien con pincel o bien mediante spray.¹

Fotografía 2.2. Cercos Recubiertos preparados para su colocación.¹



Aplicaciones.

La utilización de armaduras recubiertas con epoxi se puso en marcha en los Estados Unidos en la década de los 80 en obras de autopistas y en la construcción de puentes.¹

La confianza que la industria del transporte ha depositado sobre la utilización de aceros para concreto recubiertos con epoxi para el armado de pilas y tableros de puentes, como medida para proteger a las estructuras de la corrosión se puede constatar a través de algunos de los proyectos mas relevantes en los que se ha utilizado: el puente flotante de Hood Canal en la Península Olímpica de Washington, en las que se utilizaron 6000 toneladas de armaduras recubiertas; en el puente Florida Sunshine con 11500 toneladas de barras recubiertas, el puente de la Avenida Kline en Hammond, Indiana, en el que se utilizaron 5000 toneladas; el mayor puente atirantado de Vancouver, Columbia Británica, con mas de 4000 toneladas de barras recubiertas.¹



Fotografía 2.3. Aplicaciones de los aceros recubiertos con epoxi en muros.¹

Conclusiones.

“En base a los conocimientos actuales, la utilización de aceros para concretos recubiertos con epoxi ofrece la mejor y mas económica técnica para proteger al concreto del deterioro producido por la corrosión.”¹

d. Inhibidores de Corrosión.

El inhibidor de corrosión es una sustancia que se agrega a la mezcla de concreto ya sea formando películas sobre la superficie metálica, tales como los molibdatos o fosfatos, o bien entregando sus electrones al medio; para proteger al refuerzo del ataque corrosivo, aunque puede ir en detrimento de las propiedades del concreto. Por lo general los inhibidores de este tipo son azoles modificados que actúan sinérgicamente con otros inhibidores tales como nitritos, fosfatos y silicatos.⁴





Los inhibidores de corrosión podrían ser la mejor solución en aquellos casos donde el concreto reforzado se prepara con aguas salobres o marinas, o con arenas con alto contenido de cloruros. También, en aquellos casos donde se ejecutan construcciones/repificaciones y en zonas de salpique en ambientes marinos.⁴

Unos de los primeros inhibidores de corrosión utilizados en campo ha sido el nitrito de calcio, pero su efectividad depende de la concentración de iones cloruro en el concreto. Ha sido utilizado como aditivo del concreto y más recientemente por impregnación en concreto endurecido. Últimamente se ha estado comercializando con otros inhibidores, pero no se tienen resultados de estudios a largo plazo.⁴

La química de los inhibidores no está del todo desarrollada aun. Su uso es en el campo de los sistemas de enfriamiento o disipadores de calor tales como los radiadores, torres de enfriamiento, calderas y "chillers".

A nivel de laboratorio se han estudiado otros inhibidores como el ZnO con resultados satisfactorios, sin embargo su evaluación en campo es muy reciente.⁴

Es también conveniente mencionar que un inhibidor de corrosión deberá especificarse sobre que tipo de corrosión va a inhibir dado la gran diversidad de tipos y formas de corrosión dependiendo principalmente de las condiciones del medio donde se está llevando a cabo esta.

Para abundar un poco más en este tema hablaremos de los inhibidores de corrosión Migratorios que ya en la actualidad se han estado utilizando con mas frecuencia en estructuras afectadas por el progreso de la corrosión.

Inhibidores de Corrosión "Migratorios".

Para paliar este problema de suma importancia que es la Corrosión de las estructuras de concreto reforzado existen, desde hace años, diferentes medidas de protección. Una de ellas es el empleo de inhibidores de corrosión, existiendo una amplia gama de productos que pueden clasificarse en diversos grupos en función de su aplicación y del tipo de proceso de corrosión existente. Quimilok S.A. es una empresa especializada en la prevención y resolución de problemas derivados de la corrosión de las armaduras, utilizando para ello productos MCI (Migrating Corrosión Inhibitor) de Cortec Corporation, cuyas características y principios de funcionamiento van a exponerse a continuación.¹





Fotografía 2.3. Efectos de la Corrosión.¹

Descripción general de la Tecnología MCI.

Los inhibidores de corrosión migratorios (MCIs) están basados en la química del aminocarboxilato y de los aminoalcoholes. Estos inhibidores del tipo mixto, pues impiden la reacción en el ánodo y en el cátodo, presentan en condiciones normales una fase vapor que es controlada por la estructura del compuesto y el carácter de la cadena de átomos de la molécula. El vapor protector se expande dentro de la estructura porosa del concreto hasta que se alcanza el equilibrio, determinado por su presión vapor que oscila entre 10^{-3} a 10^{-5} mm Hg, momento en el que se condensa dando lugar a una reacción de adsorción sobre la armadura que impide los procesos de corrosión.¹

Tipos de Inhibidores de Corrosión Migratorios (MIC).

Los inhibidores de corrosión migratorios pueden dividirse en dos grandes grupos diferenciados entre sí por la química básica de su composición, y que proporcionan unos niveles de protección contra la corrosión diferentes.¹

a. Inhibidores de Corrosión basados en Aminoalcoholes.

Este tipo de inhibidores migratorios fueron los primeros que se desarrollaron por la industria. Se caracterizan por tener una carga parcial positiva (+) y otra negativa (-) dentro de la propia molécula, que hace que sea atraída por el acero aunque la carga de la molécula sea nula. Estas cargas parciales son atraídas por el cátodo y el ánodo, respectivamente, lo que hace que se reduzca la corrosión. Este tipo de productos, según los estudios realizados, extiende ligeramente el tiempo de inicio de la corrosión y cuando esta comienza disminuyen su velocidad a la mitad de la que se obtendría en el caso de no haberlos utilizados.¹





b. Inhibidores de Corrosión basados en Aminocarboxilatos.

Al igual que los aminoalcoholes este tipo de MCI tienen cargas parciales positivas (+) y negativas (-), con la diferencia de que parte de las moléculas reaccionan con el concreto sellando los poros y evitando así la penetración de agentes agresivos procedentes del exterior. Al mismo tiempo, las moléculas libres N^+ y COO^- , con una afinidad con el acero mucho mayor que en el caso anterior, se ven atraídas por las áreas catódicas y anódicas del acero, proporcionando con este doble efecto un mayor nivel de reducción de la corrosión que en el caso anterior, llegando a triplicar el tiempo de iniciación de la corrosión, y reduciendo la velocidad de progresión de esta hasta en cinco veces con relación al acero desnudo.¹

Formas de Aplicación.

Los productos MCI pueden aplicarse de forma distinta en función del tipo de producto elegido, de la función principal del mismo, y de las necesidades de cada caso concreto. En principio vamos a distinguir entre aplicaciones realizadas cuando la obra ya está finalizada, y cuando ésta es obra nueva.¹

Protección Anticorrosiva en Obra Finalizada.

La aplicación de inhibidores de corrosión migratorios MCI en estructuras ya construidas se lleva a cabo directamente sobre la superficie del concreto, bien mediante pulverización, o bien mediante pintado con brocha o rodillo. Una vez aplicado, este compuesto orgánico migra a través de la estructura porosa endurecida del concreto hasta llegar a la armadura debido a los siguientes fenómenos:¹

- Acción Capilar: el líquido penetra dentro del concreto por presión osmótica y acción capilar.
- Difusión de Vapor: el vapor se mueve a través del concreto debido a gradientes de concentración.
- Atracción Iónica: los iones viajan a través del concreto atraídos por las áreas anódicas y catódicas de la armadura metálica debido a sus cargas positivas (+) y negativa (-).

Una vez que el MCI llega a la armadura el producto forma una capa monomolecular debido a un triple efecto:

- La separación en iones de las sales iónicas.
- La reacción y enlace con la superficie del metal.
- El establecimiento de una adsorción física.





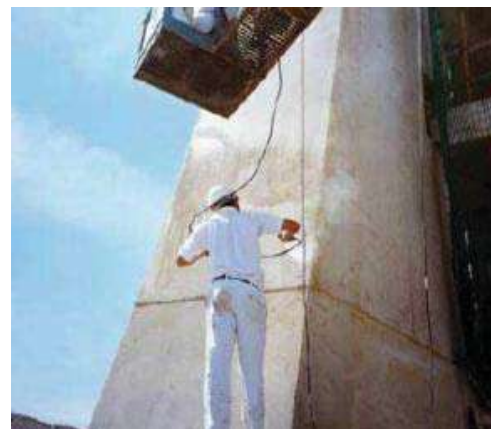
Como consecuencia se produce una drástica reducción de la corrosión al producirse un cambio de potencial en las áreas anódicas y catódicas, formándose una capa hidrofóbica que impide la penetración de los iones que causan la corrosión. El nitrógeno presente en las moléculas de MCI proporciona, además, un tenaz enlace sobre la armadura.¹

Estos productos pueden ir acompañados de otros compuestos que actúan directamente sobre el concreto. Por ejemplo, pueden ir acompañados de micro-sílice para efectuar un sellado de los poros superficiales, siendo especialmente recomendable en aquellas estructuras que pudieran estar expuestas a la acción de ciclos de hielo-deshielo, como pueden ser las de alta montaña, ya que este tipo de material impide la escamadura del concreto.¹

También pueden ir acompañadas de hidrofugantes para mejorar las características superficiales del concreto.

Todos estos inhibidores permiten, tras su llegada a la armadura metálica, desplazar los iones cloruro que pudieran estar presentes en la superficie del acero, como ha podido comprobarse en ensayos de espectroscopia de rayos-x realizados en estructuras con un inicio de corrosión.¹

Las dotaciones de este tipo de inhibidores varían en función del tipo de inhibidor utilizado, amino-alcohol o aminocarboxilato, y depende igualmente del tipo de soporte: generalmente los inhibidores mas potentes (aminocarboxilato) precisan de una sola capa de aplicación, siendo sus consumos de aproximadamente 0.3 l/m² y capa; para productos menos potentes (amino-alcohol) se precisan un mayor numero de capas con dosificaciones similares por capa.¹



Fotografía 2.4. Aplicación mediante Rodillo y Pistola de los Inhibidores MCI.¹





Protección Anticorrosiva en Obra Nueva.

La aplicación de inhibidores de corrosión migratorios MCI en estructuras de nueva construcción se lleva a cabo mediante la adición de los inhibidores directamente en el amasado del concreto, sin que resulten afectadas las propiedades físicas de este, o bien mediante el recubrimiento de la armadura, que proporciona una protección a esta no solo durante los periodos de almacenaje (hasta 5 años), sino también a lo largo del periodo de vida de servicio de la estructura, sin necesidad de tener que ser eliminado al no interferir en las condiciones de adherencia con el concreto.¹

Estos productos suelen dosificarse en forma de polvo o líquido, pudiendo contener, como en el caso anterior, microsilíce para mejorar el sellado de los poros y reducir la red capilar del concreto. La proporción en la que hay que dosificar estos productos al concreto es muy reducida (0.61 l/m³), por lo que no es preciso llevar a cabo una especial vigilancia sobre la relación agua/cemento.¹

En el caso de los productos aplicados directamente sobre la armadura, se trata de un tipo de pintura al agua que forma una película que endurece tras un periodo de curado, no siendo pegajosa al tacto e impidiendo, por lo tanto, la adhesión de polvo e impurezas que pudieran dificultar las condiciones de adherencia con el concreto.¹

Este recubrimiento se aplica en espesores de film seco que varían entre 5 y 25 µm dependiendo del tipo de protección que se quiera realizar, pudiendo ser pigmentado si así se requiere aunque en origen es transparente.¹



Fotografía 2.5. Aspecto de una estructura tras la aplicación superficial de los inhibidores MCI (Autopista de peaje A-6)¹





Los posibles defectos superficiales que pudieran experimentar las barras como consecuencia de los procesos de conformación de la armadura (doblado, soldadura, corte, etc.) son fácilmente reparables a través de una sencilla operación de retoque.¹



Fotografía 2.6. Barras antes y después de ser recubiertas con inhibidores MCI.¹

Reparación Antocorrosiva en Rehabilitaciones.

En actuaciones de rehabilitación de estructuras afectadas por fenómenos de corrosión es recomendable aplicar un sistema completo de reparación anticorrosivo, para lo cual pueden utilizarse productos inhibidores de la corrosión contenidos en morteros de reparación, lechadas pasivantes, inyecciones, etc. En aquellas zonas donde no se tiene un acceso directo sobre las armaduras es recomendable aplicar un producto de superficie mediante pulverización, brocha o rodillo, ya que puede penetrar hasta ellas contrarrestando el efecto de la corrosión que se haya podido producir y disminuyendo la velocidad de propagación de esta.¹



Fotografía 2.7 a y b.- Dos ejemplos de aplicación de productos MCI como lechada y como mortero de reparación.¹





Criterios para la Selección de Productos MIC.

Existen diferentes opciones a la hora de evaluar la efectividad de los inhibidores de la corrosión MIC en el concreto armado, tanto de aplicación en la propia masa como los de aplicación en superficie, pero la más habitual es la contenida en la norma ASTM G-109 "Standard Test Method for determining the effects of Chemical Admixtures on the corrosion of embedded Steel reinforcement in Concrete Exposed to Chloride environments". Esta norma describe un procedimiento para determinar los efectos de los aditivos químicos sobre la corrosión de los metales en el concreto. Esta norma permite evaluar, comparativamente, la acción de diferentes inhibidores, tanto en los aspectos relativos al momento de aparición de la corrosión, como en la progresión de esta una vez iniciada, frente a los cloruros, determinando así su mayor o menor funcionalidad en función del caso concreto al que se vayan a aplicar.¹

A la hora de evaluar los recubrimientos de aplicación directa sobre las armaduras, se aplican los test habituales en recubrimientos de niebla salina (ASTM B-117) y de humedad (ASTM D-1748).¹

Control de calidad en Obra.

Los diferentes métodos existentes para la evaluación del nivel de corrosión en el que se encuentra el acero de una estructura de concreto, a través de potenciales e intensidades de corrosión, permiten comprobar el nivel de eficacia de los productos utilizados para prevenir esta, o para contrarrestarla. Sin embargo, en otras ocasiones puede ser interesante comprobar, como es el caso de los inhibidores MIC, si estos se han aplicado de forma eficaz y en las proporciones adecuadas, o que el producto está presente en aquellos casos en los que se ha aplicado directamente sobre la armadura.¹

Un procedimiento sencillo para llevar a cabo este tipo de comprobaciones consiste en la extracción de testigos de los elementos estructurales, que posteriormente se trocean y analizan por separado, detectando la presencia del inhibidor y la profundidad de penetración de este, en su caso.¹

Este tipo de comprobaciones ha de llevarse a cabo una vez que ha transcurrido el tiempo necesario para que se produzca la migración del inhibidor hasta la superficie de la armadura. Como regla general este periodo suele ser del orden de dos meses, pudiendo variar en función del tipo de concreto presente en el elemento.¹





e. Recubrimientos sobre el Concreto.

Existe una gran variedad de recubrimientos para el concreto que pueden evitar la carbonatación, o el ingreso de cloruros, agua y oxígeno, en mayor o menor medida, en la red de poros del concreto, como: ceras, resinas, pinturas y membranas. Ninguna de estas soluciones parece ser capaz de detener la corrosión cuando se aplican una vez comenzado el fenómeno, aunque tampoco aceleran el ataque y evitan la penetración de nuevas cantidades de agentes corrosivos.²

La aplicación de pinturas se muestra eficaz para retardar o evitar la carbonatación, consiguiendo también un aumento de la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado con revestimientos hidrófugos o impermeables al agua. La eficacia de estas medidas, en principio, debe depender fuertemente del momento en que se aplique la protección. Si los recubrimientos se aplican cuando el frente de carbonatación ya ha alcanzado el nivel de las armaduras, o cuando ya han penetrado cloruros en cantidad suficiente para desencadenar la corrosión del acero en estado activo, un recubrimiento impermeable podría resultar satisfactorio solo en el caso de que se aplique sobre concretos secos con una resistividad elevada que, en tales circunstancias, es el factor controlante de la cinética de la corrosión. Si el concreto se aplicara sobre concretos carbonatados y/o con cloruros y húmedos pueden resultar incluso perjudicial, porque evitaría que los periodos de secado redujeran la velocidad de corrosión.²

f. Otros Métodos de Protección.

No se pretenden agotar en esta revisión todos los procedimientos de prevenir la corrosión en las estructuras de concreto reforzado o de combatir sus efectos una vez iniciada la corrosión, porque el interés y los costos del problema son de tal magnitud que se afrontan múltiples enfoques en busca de soluciones eficaces. Solo se ha intentado un somero análisis de los métodos más utilizados. No obstante, hay que hacer notar que muchos otros pueden conducir a resultados prometedores como, por ejemplo, el empleo de cemento con adiciones de cenizas volantes para controlar el ingreso de cloruros en el concreto por reducción de su penetrabilidad, o para disminuir la proporción de cloruros libres por reacción o igualdad de contenido total de cloruros, o bien por la extracción de cloruros mediante elevadas densidades de corrientes utilizando ánodos externos, procedimientos que, por el momento no se han difundido en la práctica.²





2.1.6. PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA.

La vida útil de una estructura se puede definir como el periodo de tiempo durante el cuál la estructura conserva todas las características de funcionalidad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente.⁷

El modelo mas extendido para predecir la vida útil de una estructura de concreto reforzado con acero es el que propuso Tuutti, que se muestra en la Figura 2.10. En él se representa en las abscisas el tiempo y en las ordenadas el grado de deterioro.⁷

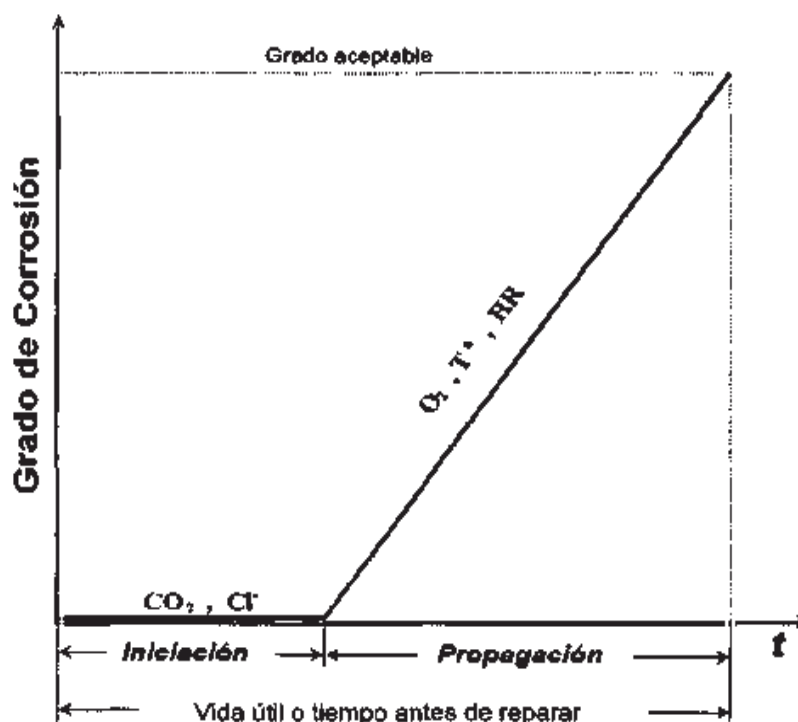


Figura 2.10.- Modelo de Tuutti de Estimación de la Vida en Servicio en las Estructuras de Concreto Reforzado.²

La vida en servicio de una estructura, según el modelo simplificado de Tuutti, puede considerarse integrada por dos periodos, el de iniciación y el de propagación (Figura 2.8). El primero se extiende hasta el momento en que el CO₂ atmosférico y/o los cloruros (u otro agresivo) del medio, caso de que éste los tuviera, llegan en cantidad suficiente hasta las armaduras para desencadenar la corrosión en estado activo del acero, a una velocidad significativa, iniciándose, entonces, el periodo de propagación, que presenta una pendiente que depende de parámetros asociados al ambiente y al concreto, como el oxígeno, la temperatura y el grado de saturación de los poros del concreto.²





Durante el periodo de propagación tienen lugar los deterioros sobre el concreto y la armadura, como son: pérdida de sección y ductilidad de la armadura, fisuración del concreto y pérdida de adherencia armadura / concreto. ²

Actuando sobre el espesor y la calidad del recubrimiento puede prolongarse el periodo de iniciación de forma que se cumplan las previsiones de vida en servicio prevista en el proyecto. La calidad del recubrimiento depende de multitud de factores, como pueden ser: el tipo de cemento, las relaciones agua/cemento (a/c) y cemento/arena (c/a), etc. Aunque sea una visión parcial de la calidad, el factor que mejor puede representarla por si solo quizás sea la porosidad o penetrabilidad, a medida representativa de la eficacia de la barrera que el recubrimiento opone a la penetración de los agentes agresivos del medio. En la Figura 2.11. Pueden observarse hasta que punto una excesiva relación a/c puede perjudicar la calidad del concreto variaciones cualitativamente similares pueden encontrarse para los grados de compactación e hidratación. ²

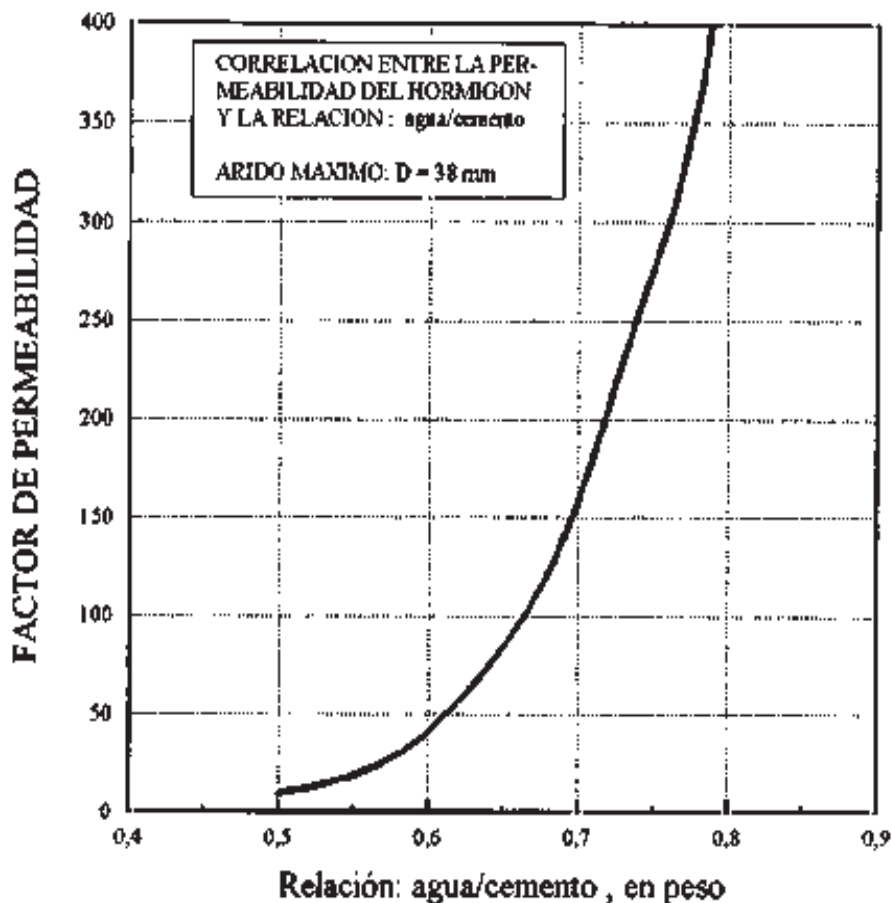


Figura 2.11.- Correlación entre la Permeabilidad del Concreto y la Relación a/c.





2.1.7. VIDA RESIDUAL DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO.

Se define como vida útil residual el periodo de tiempo en que la estructura cumple las prestaciones para las que ha sido calculada sin costos importantes de mantenimiento; o bien, el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza el anterior límite inaceptable. Durante este periodo residual se suele acometer la reparación de la estructura o se interviene en ella para restituir unas condiciones de seguridad, funcionalidad o estética lo más similares, o incluso superiores a las del proyecto. Así pues, la acepción de residual se aplica mientras la estructura no sea intervenida, e implica por tanto la idea de que la estructura se degrada progresivamente a una determinada velocidad.⁴

El momento óptimo para la intervención no se puede generalizar, ya que este se debe deducir del balance equilibrado de los siguientes factores:⁴

- Técnicos: capacidad portante residual o pérdida de funcionalidad o estética.
- Económicos: costo de la reparación.
- Sociales: alteraciones y daños por inhabilitación temporal de la estructura.⁴

Una vez que la estructura es reparada se establecerán los requisitos mecánicos, estructurales y ambientales que se han considerado para realizar esta reparación y se informara de los tiempos de referencia para el calculo de la vida útil que se espera después de la reparación.⁴





3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

3.1. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN.

3.1.1. GENERALIDADES

En capítulos anteriores fueron señalados y analizados los diversos factores que pueden dar lugar a la corrosión del refuerzo del concreto. El conocimiento de las diferentes manifestaciones - apreciables a simple vista o no - originadas como resultado de los fenómenos corrosivos, es fundamental para su detección y para la elaboración del diagnóstico de las fallas. Por ello, la inspección de la obra constituye una etapa muy importante en la evaluación y posterior reparación de las estructuras de concreto armado dañadas por corrosión, ya que a través de ella se obtiene - directa o indirectamente - la información requerida para la solución del problema.⁴

Los procedimientos relacionados con la inspección de una estructura de concreto armado desde el punto de vista de corrosión pueden implicar una labor bastante sencilla en algunos casos o, por el contrario, una ardua en otras, según la complejidad de los problemas, así como dependiendo de la magnitud y naturaleza de la obra. Antes de abordar esta actividad debe conformarse un equipo multidisciplinario de trabajo con al menos un especialista en corrosión, uno en estructura y uno en técnicas constructivas.⁴

En términos generales, las siguientes etapas corresponden a una inspección en obra (Figura 3.1):⁴

- a) Elaboración de una Ficha de Antecedentes de la estructura y del medio ambiente (en base a información documental y/o visita previa).
- b) Examen visual general de la estructura.
- c) Levantamiento de daños.
- d) Selección de zonas para examen visual detallado de la estructura y Elaboración de Plan de Muestreo.
- e) Selección de técnicas de ensayo / medición / análisis más apropiadas.
- f) Selección de zonas para la realización de ensayos / medición / análisis físico-químicos en el concreto, armadura y en el medio ambiente circundante.
- g) Ejecución de mediciones, ensayos y análisis físico-químicos en el concreto y / o en la armadura (sin necesidad de elaboración de Planes de Trabajo, o en base a ellos, según sea el caso).⁴



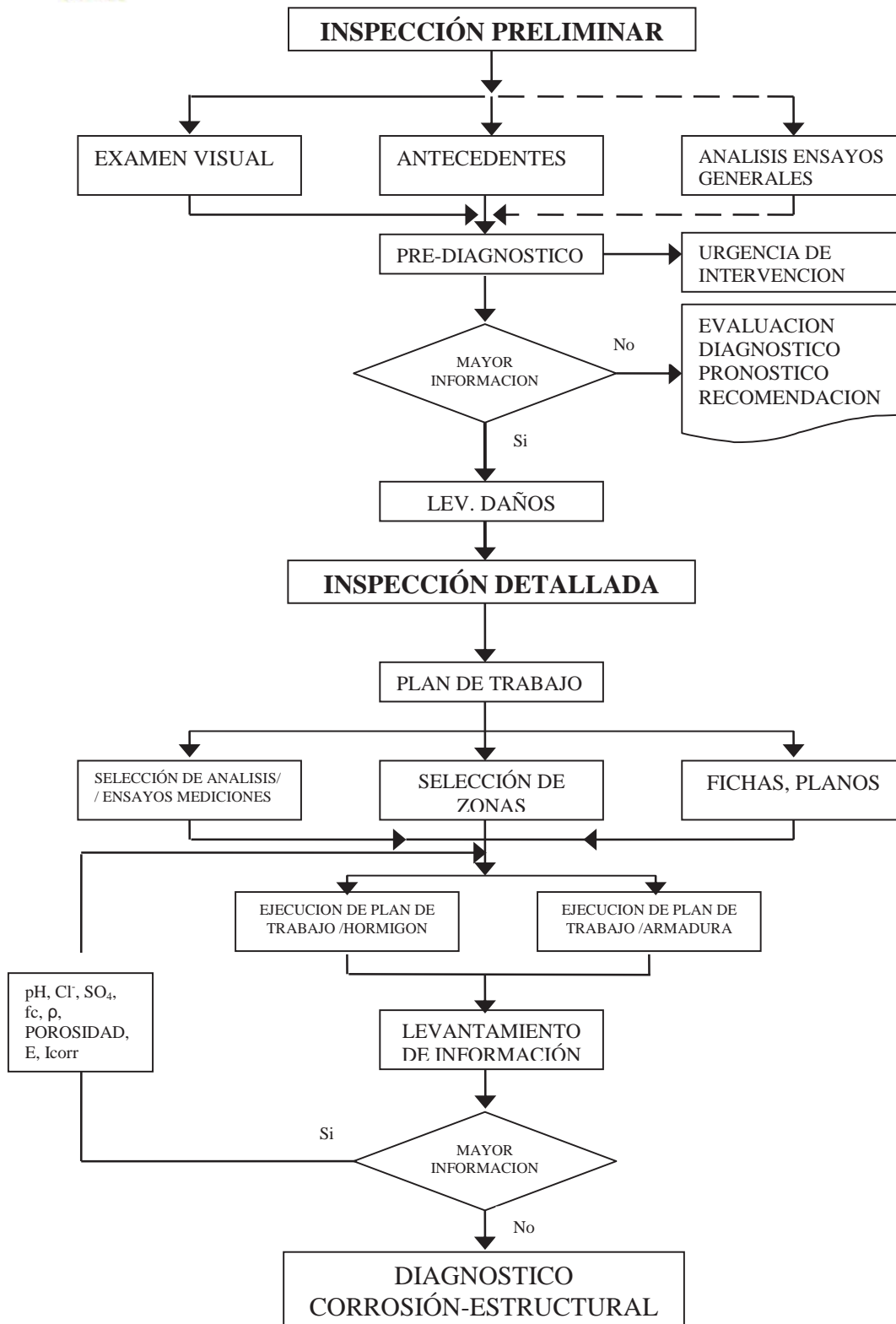


Figura 3.1. Pasos para la Inspección en Obra.⁴





La secuencia presentada no significa que todas las actividades deben ser necesariamente llevadas a cabo.⁴

De acuerdo al tipo y magnitud de la información que se desee obtener se puede hablar de una Inspección Preliminar y de una Inspección Detallada.⁴

Básicamente, la llamada Inspección Preliminar permitirá tener una idea general del contexto que rodea a la estructura con problemas. Puede estar sustentada en una visita previa y, de la necesidad de un análisis más profundo para la elaboración del diagnóstico correspondiente - lo cual dependerá principalmente, de la complejidad del problema, riesgos involucrados y de la experiencia de la persona responsable de la evaluación - se procederá a la realización de actividades de preparación para la llamada Inspección Detallada.⁴

Así, mientras que los puntos señalados como a) y b) constituyen pasos obligados en una inspección preliminar, la realización de ensayos, mediciones y/o análisis físico-químicos (g) pueden ser o no realizados en esa etapa, y las actividades de c) a f) sólo si se decide que es necesaria una inspección pormenorizada, para la elaboración del diagnóstico y/o con miras a una posterior reparación de la estructura.⁴

La inspección Preliminar permite la elaboración de un diagnóstico en algunos casos o de un pre-diagnóstico en aquellos más complejos.⁴

En la Inspección Detallada se llevarán a cabo los ensayos y las mediciones requeridas para obtener datos suficientes - en naturaleza y en número - y confiables, siguiendo los esquemas programados en la inspección preliminar, que permitan una evaluación acertada del problema y, eventualmente, definir los sistemas de intervención (pronóstico de vida residual, reparaciones, rehabilitaciones, etc.). El punto g) es inherente a los objetivos definidos para esta etapa.⁴

Luego, como se muestra en el esquema de la Figura 3.1, existen ciertas actividades propias de cada tipo de inspección - según han sido definidas - y otras, cuya ejecución estará condicionada a la naturaleza y características del problema.⁴

3.1.2. INSPECCION PRELIMINAR.

Como ya se ha indicado, en base a la información obtenida mediante esta etapa, es posible ya determinar la naturaleza y el origen del problema, o bien constituir sólo la etapa previa a un estudio más detallado.⁴

Las actividades propias de esta etapa son:⁴





3.1.2.1. Elaboración de una Ficha de Antecedentes de la Estructura y del Medio.

a. Estructura.

Se debe procurar recoger la mayor información posible referente a la edad o tiempo en servicio, naturaleza y procedencia de los materiales del concreto, dosificación y resistencia característica del concreto, tecnología de fabricación del concreto, edad del inicio de los problemas, diagnósticos y/o reparaciones anteriores, niveles de tensiones de trabajo de los elementos o componentes estructurales, eventuales cambio de uso, etc.; tal como se muestra en el Formulario 1.⁴

Formulario 1.⁴

FICHA DE DESCRIPCION Y ANTECEDENTES DE LA ESTRUCTURA

I. Datos Generales de la Estructura.

I.1. Tipo de Estructura.	Descripción básica de la Estructura
Edificación.	_____
Puente.	_____
Muelle.	_____
Muro de Contención.	_____
Tanque de Almacenamiento.	_____
Plataforma Continental.	_____
Otro	

I.2. Fecha de Construcción de la Estructura. _____

I.3. Uso General de la Estructura. _____

I.4. Croquis de ubicación, coordenadas de la fachada, orientación y dirección del viento indicando el medio de exposición.

II. Datos Particulares de la Estructura.

II.1. Propiedades de los Materiales.
Tipos de Cemento: _____ Tipo de Agua. _____
Naturaleza de los Áridos: _____





Formulario 1... (Continuación.)

II.2. Diseño del Concreto.

Resistencia característica a la Compresión: _____
Dosificación de Cemento: _____ Dosificación de Agregados: _____
Relación Agua/Cemento: _____ Uso de Aditivos: _____

II.3. Propiedades de los Materiales.

En Obra. Prefabricado.
Concreto Reforzado Pretensado. Postensado.
Tecnología de Fabricación en Obra: _____
Método de Compactación: _____
Método de Curado: _____

III. Historial de Vida en Servicio de la Estructura.

III.1. Fecha de Puesta en Servicio: _____
III.2 Resistencia del Concreto a la Compresión en Obra: _____
III.3. Anomalías Observadas durante la Construcción: _____

III.3. Anomalías anteriormente Detectadas:

III.4. Ensayos y Mantenimiento.

Resultados de la Prueba de Carga: _____

Inspecciones Rutinarias: _____

Ensayos Particulares: _____

Tipos de Mantenimiento: _____

III.5. Reparaciones.



**Formulario 1... (Continuación.)****IV. Información Adicional.**

Fecha: _____ Elaborado Por: _____
 Nombre de la Institución: _____

b. Medio.

Información que permita caracterizar su agresividad. Es fundamental señalar la forma de interacción entre el medio y la estructura afectada; en este sentido, posteriormente corresponderá al criterio y experiencia del evaluador el determinar y calificar la intensidad de dicha interacción. Principalmente deben indicarse, tal como sugiere el Formulario 2, los siguientes aspectos: ⁴

Formulario 2. ⁴

FICHA DE DESCRIPCIÓN DEL MEDIO			
I. Agentes Físico-Químicos en contacto con la Estructura.			
<input type="checkbox"/> Atmósfera	<input type="checkbox"/> Agua	<input type="checkbox"/> Suelo	<input type="checkbox"/> Otro Medio
<input type="checkbox"/> Rural	<input type="checkbox"/> Natural	<input type="checkbox"/> Natural	<input type="checkbox"/> Alta Temperatura
<input type="checkbox"/> Urbana	<input type="checkbox"/> Dulce	<input type="checkbox"/> Salobre	<input type="checkbox"/> Agentes Químicos
<input type="checkbox"/> Marina	<input type="checkbox"/> Domestica	<input type="checkbox"/> Potable	<input type="checkbox"/> Corrientes de Interferencia
<input type="checkbox"/> Industrial	<input type="checkbox"/> Residual	<input type="checkbox"/> Relleno	<input type="checkbox"/> Atmósfera Especifica
<input type="checkbox"/> Industrial	<input type="checkbox"/> Industrial		
II. Propiedades Físicas y Químicas del Medio			
<input type="checkbox"/> Atmósfera	<input type="checkbox"/> Agua	<input type="checkbox"/> Suelo	
<input type="checkbox"/> Humedad Relativa: _____	<input type="checkbox"/> Cloruros: _____	<input type="checkbox"/> Cloruros: _____	
<input type="checkbox"/> Temperatura: _____	<input type="checkbox"/> Sulfatos: _____	<input type="checkbox"/> Sulfatos: _____	
<input type="checkbox"/> Régimen de Vientos: _____	<input type="checkbox"/> pH: _____	<input type="checkbox"/> pH: _____	
	<input type="checkbox"/> Temperatura: _____	<input type="checkbox"/> Potencial Redox: _____	
		<input type="checkbox"/> Resistividad Eléctrica: _____	
		<input type="checkbox"/> Humedad: _____	
		<input type="checkbox"/> Nivel Freático: _____	





- *Tipo de Atmósfera* (predominantemente urbana, rural, marina, industrial, o una combinación de dos o mas tipos) y estimación de la presencia de posibles contaminantes; aproximación de los ciclos de condiciones de temperatura, humedad relativa y vientos (o ventilación) atmosféricos y locales.⁴
- *Tipo de aguas* (naturales: salobres, dulces, subterráneas, potable; de desecho: tras uso domestico o industrial, etc.), su composición química y eventual contaminación.
- *Naturaleza del terreno o suelo* (natural o de relleno, acido o alcalino, resistividad eléctrica, características).
- *Presencia de corrientes de interferencia o erráticas y evaluación de posible contaminación.*
- *Presencia de agentes químicos* (sales utilizadas para deshielo, en plantas industriales, etc.).⁴

3.1.2.2. Examen Visual General de la Estructura.

Este proceso debe permitir determinar si el problema se presenta por igual en todos los elementos de las mismas características, o si existen diferencias por causas locales (puntuales). Para ello, debe realizarse un examen diferenciado por elementos, registrando los signos aparentes de corrosión (manchas de oxido: color extensión y curso; fisuras: ubicación, dirección y dimensiones; zonas de desprendimiento del recubrimiento de concreto con/sin exposición de la armadura), degradación del concreto, así como cualquier otra seña particular que pudiera constituir un indicativo de algún agente externo.⁴

En la Tabla 3.1. (Propuesta por el American Concrete Institute, ACI) se presenta un ejemplo de cómo puede realizarse la tipificación de los daños y una clasificación según códigos e información adicional relevante; existen otras sugerencias interesantes, como la dada por la RILEM Draft Recommendation.⁴

Es importante elaborar un registro fotográfico amplio que acompañe las observaciones. Luego, además de binoculares (para acceder a zonas donde no es posible una observación directa), se debe incluir una cámara fotográfica apropiada como parte del equipo necesario para llevar a cabo una Inspección Preliminar.⁴













En el Formulario 3 se muestra una posible forma de presentación simultánea de tipificación de daños localizados en un croquis de la estructura y el respectivo reporte fotográfico.⁴

Tal como se señalo antes, si el problema no es complejo y los evaluadores son experimentados, puede ser suficiente la información hasta aquí obtenida para dictaminar la(s) causa(s) y elaborar el pre-diagnostico. Se procederá entonces a la elaboración de croquis/planos con el levantamiento de daños, para proceder a la evaluación.⁴





Tabla 3.1. Inspección Visual – Clasificación Simplificada de Daños. ⁴

LEYENDAS	CODIGO	DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	DETALLES QUE DEBEN SER DADOS POR LA INSPECCION
 DELAMINACION ACERO EXPUESTO  PARCHEO DE REPARACION  GRIETA  MANCHAS DE HUMEDAD  MANCHAS DE OXIDO  CONCRETO FOFO  CANGREJERA  NUCLEO EXTRAIDO  PROTUBERANCIA  PROTUBERANCIA CON ACERO EXPUESTO  LIXIVIACION  INTEMPERISMO	A1	Grietas o Fisuras	Rotura de Concreto, superficial o profunda	Sobrecargas, contracción, Corrosión	Dirección, ancho, longitud y profundidad
	A2	Red de Grietas	Gritas estrechas y cortas formando una red	Cambio diferencial de volumen de Concreto superficial e interno	Ancho de grietas, tamaño de red y superficie afectada
	B1	Gel de Exudación	Gel viscoso saliendo a través de los Poros del Concreto	Reacción álcali-agregado	Superficie afectada, cantidad de deposito
	B2	Eflorescencia	Costra blanca en la Superficie del Concreto	Lixiviación de hidróxidos con o sin formación de carbonos	Superficie afectada, cantidad de deposito
	B3	Manchas de Oxido	Manchas de color marrón-rojiza	Corrosión de la Armadura, del Alambre de Amarre	Localización, intensidad, posible daño asociado
	B4	Manchas de Humedad	Zona superficial del concreto con indicios de Humedad	Escurrimiento externo o interno, condensación	Superficie afectada
	C1	Protuberancia ("Pop-Out")	Daño localizado Superficial	Desarrollo de una Presión interna local o expansión de Partículas de agregado	Localización, profundidad
	C2	Concreto Fofo	Sonido hueco al golpe del Martillo	Corrosión del acero de Refuerzo, o Cangrejeras	Superficie afectada, grietas asociadas.
	C3	Delaminación	Fragmento de Concreto separado de la Masa	Presión interna por corrosión de la armadura, o por una fuerza externa aplicada	Superficie afectada, profundidad
	C4	Intemperismo	Desgaste de la Superficie del Concreto, lavado de la pasta del Cemento	Acción del medio Ambiente que produce desgaste en la Superficie	Superficie afectada, profundidad
	D2	Nidos de Abeja (Cangrejeras)	Vacíos entre los agregados gruesos	Falta de Homogeneidad durante el vaciado del Concreto	Superficie afectada, profundidad, intensidad
	E1	Junta de Construcción	Demarcación en la superficie del Concreto, Porosa o no	Junta entre dos Colados	Localización y posible daño asociado
	E2	Junta de Delaminación	Línea formada por la unión de dos planos de Concreto	Espacio dejado para pequeños movimientos Rotatorios	Abertura, obstrucciones y cualquiera asociado a su deterioro





Formulario 3. ⁴

INSPECCION VISUAL GENERAL DE LA ESTRUCTURA.

Tipo de Estructura: _____ Edad: _____
Ubicación: _____ Ambiente: _____
Orientación: _____ Fecha de Inspección: _____

a) Tipificación de Daños y Localización en la Estructura.

Croquis de la Estructura con levantamientos de daños generales
(para Nomenclatura de daños generales ver la **Tabla I.1**)

b) Registro Topográfico.





Formulario 3... (Continuación.)

c) Extensión y Gravedad de los Daños:

d) Ensayos Mínimos a realizar:

ENSAYO	LUGAR	RESULTADO
Determinación de Cloruros o Sulfatos	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
Profundidad de Carbonatación	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
Espesor de Recubrimiento	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____

e) Prediagnóstico.





En otros casos puede requerirse la realización de un mínimo de ensayos y/o mediciones - ejecutables en campo (a pie de obra) durante la inspección preliminar - complementarios a la información básica obtenida, para llegar al diagnóstico. Según el caso, pueden ser elegidos puntos o zonas representativas, en donde se efectúen algunos de los siguientes ensayos: ⁴

- Determinación de la eventual disminución del diámetro de la armadura.
- Localización de armaduras y medición del espesor de recubrimiento de concreto.
- Determinación de la resistividad eléctrica del concreto.
- Medición de potenciales de electroquímicos.
- Determinación de la profundidad de carbonatación y presencia de iones cloruro en el concreto, bien sea cuali o cuantitativamente. ⁴

La ejecución de estos ensayos y mediciones requiere del uso de herramientas, equipos, materiales y reactivos; por lo tanto, es recomendable prever su utilización durante una inspección preliminar. ⁴

Los criterios para la elección de las zonas representativas pueden estar referidos a distintos factores que se verán posteriormente. ⁴

Finalmente, en otros casos los evaluadores pueden decidir que es imprescindible llevar a cabo una inspección detallada de la estructura y que la realización de los ensayos y mediciones, tengan lugar solo en dicha etapa. ⁴

3.1.3. INSPECCION DETALLADA.

3.1.3.1. Plan de Trabajo.

Si a partir de la inspección preliminar fue decidida la necesidad de llevar a cabo una evaluación mas completa de la problemática en la estructura a través de un Inspección Detallada, la elaboración de un Plan de Trabajo constituye una etapa intermedia. ⁴

La concepción del Plan de Trabajo requiere de la evaluación de la información básica obtenida previamente (Antecedentes, Examen Visual General y, eventualmente, Resultado de los Ensayos y/o Mediciones de Campo a pie de obra que conducen al pre-diagnóstico y, en general, incluye las siguientes actividades: ⁴

h) Elaboración de:

- Fichas, Croquis y/o planos para el levantamiento de daños
- Plan de Muestreo.
- Tabla de Tipificación de Daños.





- i) Selección de:
- Las técnicas de ensayo / medición / análisis más apropiadas.
 - Las zonas y el número en que serán efectuados los ensayos / mediciones.
- j) Planificación de:
- Materiales.
 - Equipamiento.

3.1.3.1.1. Elaboración del Plan de Muestreo.

Una vez reconocida la estructura - a través de la inspección preliminar - debe hacerse una división de ella en zonas, clasificada de acuerdo a ciertas características y/o condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura. Luego, los puntos de muestreo serán identificados con cada una de estas zonas, de manera que la evaluación considere y enmarque cada situación particular.⁴

La clasificación de las zonas debe estar basada en los objetivos de la inspección y orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños por corrosión en las armaduras. Se sugiere los siguientes criterios básicos:⁴

- Diferenciar las zonas con distintas exigencias estructurales / mecánicas.
- Identificar las características originales (al ser puesto en obra) del concreto.
- Diferenciar las zonas sometidas a distintos medios (agresivos, principalmente).
- Establecer grados de deterioro en el concreto y en las armaduras.

En base a estos criterios, resulta muy útil realizar una división más específica de estas zonas - para la identificación final de las muestras - para lo cual debe distinguirse las subdivisiones por medio de términos apropiados. La terminología a emplear no está universalmente definida; sin embargo, es de práctica común la aplicación de la siguiente clasificación:⁴

- Elemento o componente: parte de la estructura sometida a una exigencia estructural/mecánica específica, tal como vigas, losas, pilares, paredes, cimentaciones.
- Lote: conjunto de elementos o componentes fabricados con las mismas características y en las mismas condiciones.
- Fracción: subconjunto de elementos o componentes de un lote sometidos a un mismo medio.
- Muestra: conjunto de probetas extraídas de (o de mediciones efectuadas en) los componentes o elementos seleccionados como representativos de un lote. El tamaño de la muestra (número de ejemplares que constituyen la muestra) es variable, dependiendo principalmente de las dimensiones de la estructura y de la magnitud del problema.





La división de la estructura en base al grado de deterioro de las diferentes zonas estará soportada por los resultados del examen visual y de los ensayos previos eventualmente realizados.

Los croquis y/o planos de la estructura elaborados para el levantamiento de daños deben resumir esquemáticamente y de manera simple y clara los criterios de identificación aplicados y, lo mismo que en las tablas de tipificación de daños, deberá utilizarse términos (normalizados o previamente definidos en un glosario) que describan inequívocamente la situación que se desea reflejar.⁴

3.1.3.1.2. Selección de Técnicas y Zonas de Ensayo/Mediciones/Análisis.

Realizada la división de la estructura según los criterios antes mencionados debe estimarse en esta etapa, que tipo de ensayos, mediciones y/o análisis deberán ser llevados a cabo en la Inspección Detallada, y en que (y en cuantos) puntos de muestreo serán realizados. Acerca de los equipos y de la metodología para llevar a cabo estos trabajos se tratara posteriormente.⁴

3.1.3.1.3. Planificación de Materiales y Equipamiento.

En base a los resultados de las actividades expuestas en 3.1.2.1 a) y b), se deberán tomar las previsiones en cuanto a la preparación de los equipos, materiales y reactivos a utilizar (calibración, preparación de soluciones, etc.) durante la inspección detallada (o paralelamente a las obras de reparación). Se reitera la necesidad de utilizar un registro fotográfico extenso y tomar en cuenta que eventualmente sea necesario el uso de binoculares o de una cámara de video.⁴

3.1.3.2. Ejecución de la Inspección Detallada.

El Examen Visual Detallado debe considerar la inspección minuciosa, tanto del concreto (y/o de los acabados) como del estado de las armaduras.⁴

La inspección deberá abarcar todos y cada uno de los elementos, registrándose (Fichas, Planos/Croquis de Levantamiento de Daños) las anomalías observadas, las cuales están descritas en la Tabla 3.1.⁴

La inspección debe considerar la clasificación de las manchas de oxido (color, aspecto, extensión) y la morfología del ataque (uniforme o localizado, profundidad y extensión de picaduras, etc.)⁴

La realización de ensayos y mediciones en el concreto y en la armadura, así como la extracción de muestras a ser analizadas en laboratorio, puede ser llevada a cabo durante el examen visual detallado (ejecución del Plan de Trabajo).⁴





3.1.3.2.1. Ensayos a realizar en una Inspección Detallada.

Como ya ha sido señalado, una parte muy importante de la información básica necesaria para poder efectuar un dictamen sobre las causas que han podido determinar la corrosión de las armaduras y su propagación, se obtiene realizando apropiados ensayos sobre las armaduras y el concreto de la estructura.⁴ Los ensayos mínimos a realizar serían los siguientes:⁴

Para la Evaluación del Concreto.

- Resistividad.
- Ultrasonido.
- Esclerometría.
- Profundidad de Carbonatación.
- Concentración de Cloruros.
- Resistividad a la Compresión.
- Porosidad.

Para la Evaluación de la Armadura.

- Localización de la armadura y espesor de recubrimiento.
- La pérdida de diámetro del refuerzo y su límite elástico.
- La medición de Potenciales.
- La medición de la Velocidad de Corrosión.

En la Tabla 3.2 se resume la información de las técnicas más comunes, sus ventajas y limitaciones.



**Tabla 3.2.** Ensayos más Comunes en la Evaluación de Corrosión de las Armaduras. ⁴

ENSAYO	CAPACIDAD DE DETECCIÓN	APLICACIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES
Medición de Resistividad	Cualitativa.	Problemas por presencia de Cl-	Permite pre-seleccionar las áreas con potencialidad Corrosiva. Medida Rápida	Interpretación compleja de los resultados. Disponibilidad de equipo de medida. Concreto carbonatado.
Medición de Potenciales	Cualitativa.	Cualquier Estructura	Permite pre-seleccionar las áreas con potencialidad Corrosiva. Medida Rápida	Interpretación compleja de los resultados.
Medición de Velocidad de Corrosión	Cualitativa.	Cualquier Estructura	Permite, una vez conocido el tipo de corrosión, evaluar la pérdida de sección de la Armadura.	Interpretación. Disponibilidad de equipo adecuado que permite compensación de la caída óhmica (IR)
Medición de Resistencia a la Compresión y Volumen de Vacíos.	Cualitativa.	Cualquier Estructura	En conjunto con volumen de vacíos o relación agua/cemento o contenido de cemento, evalúa la calidad del concreto.	Ensayo Destructivo.
Definición de Profundidad de Carbonatación	Cualitativa.	Estructuras con Calidad del Concreto de Baja a Mala.	Prueba sencilla que permite identificar fácilmente este fenómeno y el tiempo para alcanzar la armadura.	Ensayo Destructivo.
Perfil de Cloruros.	Cualitativa.	Cualquier Estructura	Permite determinar la calidad del concreto y el tiempo para que se presente la corrosión del refuerzo.	Ensayo Destructivo. Interpretación Compleja. Apoyo Estadístico.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS.

3.2.1. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL CONCRETO.

3.2.1.1. Toma de Testigos.

Se deben definir los sitios y los tipos de testigos a retirar de la estructura, que van a ser utilizados en la realización de los ensayos. ⁴

La elección del tipo de testigos a extraer deberá estar condicionada principalmente por el ensayo a que se destina el mismo, pero también a la mayor o menor accesibilidad de los equipos al sitio donde será tomado este testigo y por el ámbito de autorización concedido por los dueños de la estructura. ⁴

Conviene también referir que una buena regla de actuación, consiste en reparar los sitios donde se han extraído testigos utilizando un mortero de reparación con baja retracción. ⁴





Los tipos de testigos más corrientes que pueden ser extraídos son:⁴

- Núcleos.
- Porciones de Material en Polvo.
- Porciones de Concreto.

3.2.1.1.1. Núcleos.

La extracción de núcleos debe ser efectuada con equipo adecuado. Algunos de los equipos existentes poseen fijación por vacío lo que facilita y reduce el tiempo de extracción de núcleos. La fijación del equipo deberá hacerse teniendo en cuenta que las muestras deberán ser tomadas perpendicularmente a la superficie del elemento componente.⁴

Las dimensiones de los núcleos dependen del tipo de ensayo a que se destina y deberán tener en cuenta las dimensiones máximas del agregado grueso.⁴

La exigencia dimensional es más importante si se pretende efectuar ensayos de resistencia a la compresión, permeabilidad o absorción del agua. Si los testigos se destinan a ensayos químicos (tales como determinación de cloruros, carbonatación, determinación del contenido en cemento) puede alternativamente optarse por la extracción de muestras de menor dimensión. Este procedimiento tiene muchas ventajas en zonas donde la extracción de testigos es de difícil acceso o en zonas de gran densidad de armaduras.⁴

La extracción de testigos destinados a la determinación de cloruros se debe hacer utilizando un flujo reducido de agua de enfriamiento del equipo y el agua a utilizar no puede ser agua contaminada con cloruros (agua de mar o salobre). Es también deseable que la superficie del concreto en la zona donde van a ser extraídos los testigos sea impermeabilizada con una tinta o cera que no contenga cloruros.⁴

Después de la extracción de núcleos deberán guardarse en bolsas de plástico bien selladas, debidamente identificados y almacenados en un local donde no halla acción directa de radiación solar ni existan grandes variaciones térmicas o humedad.⁴

3.2.1.1.2. Porciones de Material en Polvo.

Este tipo de toma de testigos es uno de los más prácticos para la realización de análisis químico de cloruros en el concreto pues la muestra obtenida va a requerir de poca preparación para la realización del ensayo.⁴





La extracción del material en polvo podrá ser efectuada utilizando un berbiquí (taladro) que disponga de una guía para la medición de profundidad de perforación y, de preferencia, que también posea un sistema automático de aspiración de polvo. El diámetro de la broca debe ser escogido teniendo en cuenta la dimensión del agregado grueso. Una dimensión corriente para la broca es de 14mm de diámetro. El número de orificios a efectuar para la recolección del polvo del material deberá asegurar que la cantidad de éste retirado de cada profundidad sea por lo menos 20grs. Siempre que se cambie de profundidad de extracción, debe procederse a limpiar la broca y el sistema de recolección de muestra, y en determinadas situaciones cambiar la broca por otra de menor diámetro.⁴

El material en polvo obtenido de cada profundidad debe ser guardado en una bolsa de plástico u otro recipiente bien sellado e identificado. Antes de iniciar el ensayo, se debe proceder a una separación previa de pequeños granos o pedazos de concreto que se pudieran haber soltado y que no ofrecen garantía de ser de la profundidad de donde se tomó el testigo. Para ello este debe ser pasado por un tamiz de 120 μm . Actualmente existen equipos específicos que permiten sacar muestras en polvo con intervalos de profundidad de hasta 2mm.⁴

3.2.1.1.3. Porciones de Concreto.

La extracción y recolección de porciones de concreto se hará por acción de un cincel y un martillo, es una técnica fácil y puede ser utilizada particularmente en los casos en que la estructura muestre zonas de delaminación de concreto. Esta técnica de toma de testigos no provoca, necesariamente, daños adicionales en la estructura, pero afecta su aspecto. Estos testigos deben ser también introducidos en bolsas de plástico bien selladas, identificadas y guardadas en locales no sujetos a grandes variaciones térmicas y de humedad.⁴

Este tipo de testigo (no aconsejado para análisis químicos) puede ser utilizado posteriormente en el laboratorio para la preparación de probetas a ser utilizadas en la realización de diversos ensayos.⁴

3.2.1.2. Resistividad Eléctrica.

3.2.1.2.1. Objetivo.

El objetivo de este ensayo es la determinación de la Resistividad Eléctrica del concreto en campo o en Laboratorio.⁴





3.2.1.2.2. Definiciones.

La resistividad Eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran porción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. En función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras.⁴

3.2.1.2.3. Materiales y Equipos.

La medida de Resistividad Eléctrica puede efectuarse bien sea: en laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o, directamente sobre la estructura en campo. Los materiales y equipos requeridos son los siguientes:⁴

- Equipo para la toma de núcleos cilíndricos.
- Medidor de Resistividad Eléctrica. Método de Wenner. 4 electrodos tipo pines.
- Equipo para medir dimensiones, con precisión de décimas.

En caso de no disponer de un equipo de medición de resistividades se puede utilizar lo siguiente:⁴

- Fuente de corriente alterna o baterías.
- Voltímetro, con capacidad de lectura de 50V y precisión del 1% e impedancia alta (>10 MΩ).
- Miliamperímetro, con capacidad de 0.1 a 250 mA y precisión del 1%.
- Electrodo.

3.2.1.2.4. Procedimiento.

El diagrama de flujo de los procedimientos para la medición de la Resistividad se presenta en la Figura 3.2.



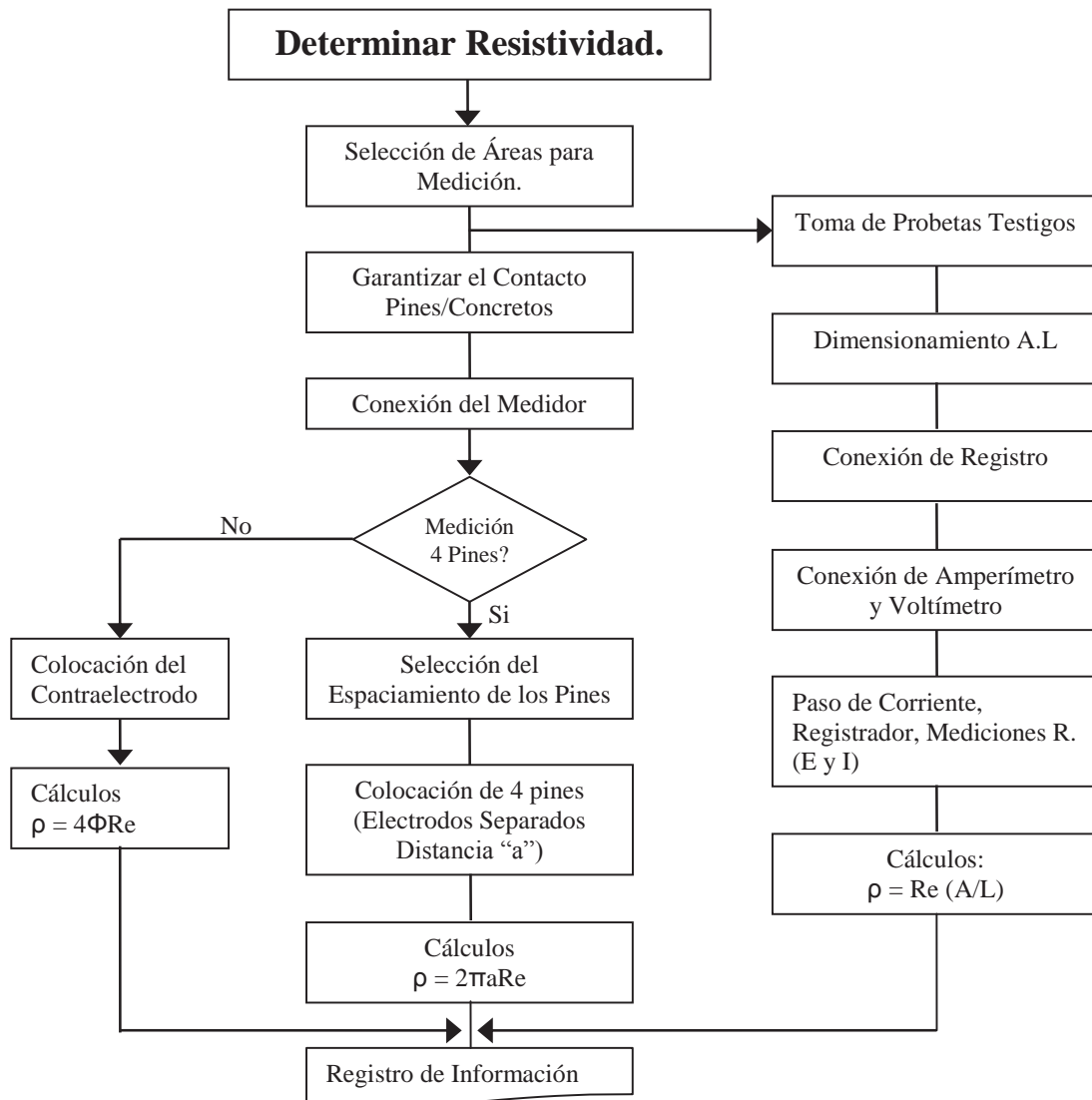


Figura 3.2. Procedimiento para la Medición de Resistividad. ⁴

Es importante resaltar que las medidas no deben hacerse sobre la armadura, ya que se falsea el resultado de estas y la carbonatación de la superficie del concreto también introduce errores apreciables en la medida. ⁴

Dado que la resistividad es función de la humedad, debe utilizarse un flujo mínimo de agua para la extracción de testigos a ser utilizados para esta evaluación y ser resguardados hasta tanto se efectuó el ensayo. ⁴





a. Para ensayos a nivel de Laboratorio.

Una vez definido el procedimiento de muestreo en la estructura y tomados los núcleos correspondientes, se procede a tomar sus dimensiones (área, A, diámetro, Φ, y longitud, L) y a efectuar el montaje del ensayo, según la Figura 3.3, donde I representa el miliamperímetro y E el voltímetro. ⁴

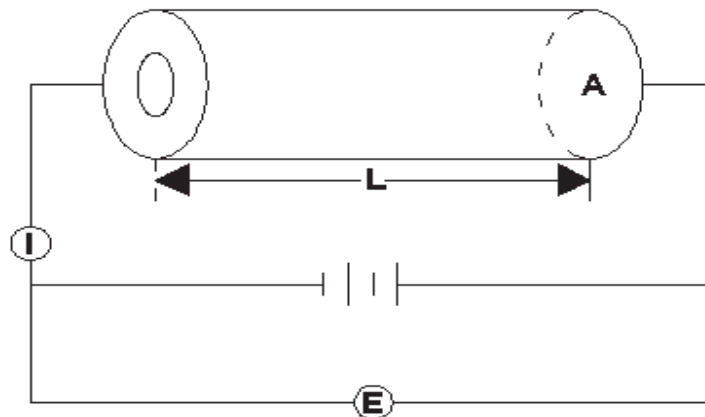


Figura 3.3. Montaje de la Prueba de Resistividad en el Laboratorio. ⁴

Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen se somete éste a una corriente dada, (I) y se registra el voltaje, E. La resistencia eléctrica, Re, se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la Resistividad Eléctrica está dada por: ⁴

$$\rho = Re (A/L)..... \text{ Ohm-cm. (ohm-m)}$$

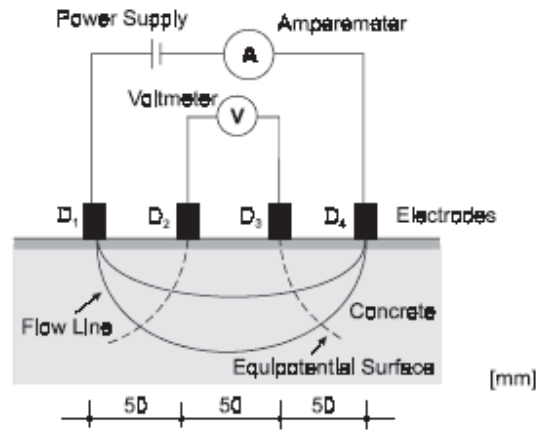
Donde: A = Área transversal del espécimen.
L = Longitud del espécimen.

b. Para Ensayos "in situ".

- Método de Wenner. La Figura 3.4 presenta el esquema del montaje del ensayo. Prehumedecer las puntas de los pines para garantizar un buen contacto con el concreto; las cuatro terminales del equipo medidor de la resistividad se colocan sobre la estructura en línea recta, a un espacio "a" uniforme. La profundidad "b" debe ser inferior con respecto al espaciado o al menos no excederlo en un 5%. "a" puede ser del orden de 50mm, mientras "b" será de 3mm. A través de los electrodos exteriores pasa una corriente (I) y se mide el voltaje (E) entre los dos electrodos interiores. De igual manera que en el caso anterior, se calcula la Resistencia, Re. La resistividad esta dada por: ⁴

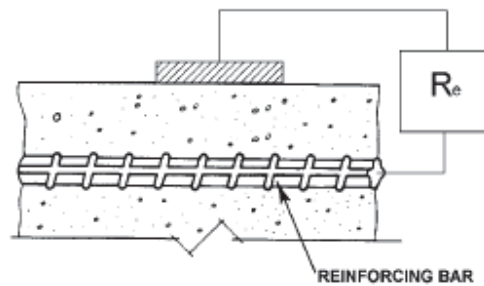
$$\rho = 2. \pi. a. Re.....\text{ohm-cm (ohm-m)}$$





(a)

$$\rho = 2 R_e \phi$$



(b)

Figura 3.4. Montaje de la Prueba de Resistividad en Campo. ⁴

Como electrodos se pueden utilizar uno de Cu/CuSO₄ o clavos metálicos. Es fundamental asegurar un buen contacto de las cuatro puntas al concreto.

- La Figura 3.4.b muestra otro método que se puede aplicar "in situ". Consiste en la utilización de un disco de pequeño diámetro que se coloca sobre la superficie del concreto y se conecta a la armadura que actúa de contra electrodo. Se aplica un pulso de corriente o un incremento de potencial y se mide el salto instantáneo inducido en la variable (E o I), conjugada. Es decir se evalúa la caída óhmica mediante el pulso eléctrico. ⁴

El valor de la resistividad resulta:

$$\rho = 2 \Phi R$$

Donde: Φ = diámetro del disco en cm.

R = caída óhmica medida.

Si no se cuenta con un medidor portátil apropiado, se puede utilizar cualquier instrumento capaz de medir la resistencia por el método de interrupción de corriente. ⁴





3.2.1.2.5. Criterios de Evaluación.

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general:⁴

$\rho > 200 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Poco Riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Riesgo Moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Alto Riesgo

3.2.1.2.6. Observaciones.

Debe tenerse en cuenta que la resistividad es solo uno de los parámetros que controla la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, por lo tanto no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura.⁴

3.2.1.3. Ultrasonido.

3.2.1.3.1. Objetivo.

Este ensayo no destructivo tiene como principales objetivos:⁴

- Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del concreto.
- Detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

3.2.1.3.2. Definiciones.

Velocidad de Pulso. La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un pulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un pulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de onda.⁴

Homogeneidad. Es la cualidad del concreto por la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas.⁴





3.2.1.3.3. Equipos y Materiales.

- Pacómetro.⁴
- Acoplante (silicona, vaselina).
- Equipo Comercial de Ultrasonido.
 - Circuito generador-receptor (aparato de pulso eléctrico de baja frecuencia ultrasónica)
 - Transductor-emisor (aparato que posibilita la transformación del pulso eléctrico en onda de choque en una banda de 24 kHz hasta 500 kHz.
 - Circuito medidor de tiempo (aparato que permite medir el tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.
 - Cables coaxiales que deben permitir la conexión perfecta de los transductores al circuito generador-receptor.
 - Barra de referencia. Pieza que permite la calibración del equipo de ultrasonido, cuya superficie tiene un acabado pulido y el tiempo de recorrido grabado.⁴

3.2.1.3.4. Procedimiento.

La Figura 3.5 muestra el diagrama de flujo para el procedimiento a seguir en este ensayo.⁴

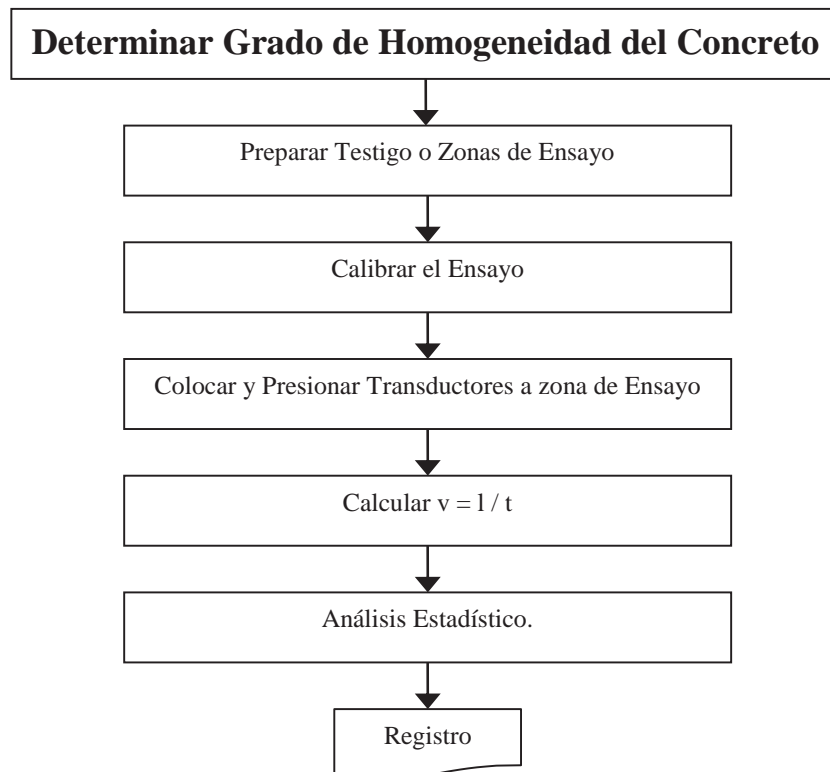


Figura 3.5. Procedimiento para la aplicación del Ensayo de Ultrasonido.⁴





a. Preparación de los Especímenes o Zonas de Ensayo del Concreto.

Los especímenes o zonas de concreto a ser ensayadas deben tener superficie plana, lisa, exenta de suciedad y no deben estar carbonatadas.⁴

Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, deberán regularizarse a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo, a fin de posibilitar un buen acoplamiento con los transductores, pero sin que puedan interferir en la medida.⁴

Los especímenes o zonas de concreto a ser ensayados deben ser homogéneos en composición y en humedad relativa.⁴

Se recomienda que en estructuras donde el concreto es razonablemente uniforme el ensayo puede ser realizado en puntos diferentes de mallas de 1 m. En el caso de concreto con muchas heterogeneidades o de piezas más pequeñas, es necesario un espaciamiento menor. Deben ser evitadas zonas donde exista una gran concentración de armadura, principalmente en el sentido longitudinal de propagación de las ondas, puesto que la velocidad de propagación de onda es mayor en el acero que en el concreto.⁴

b. Ensayo.

Calibrar el aparato usando la barra de referencia o dispositivo equivalente o del equipo. Posicionar los transductores como se indica a continuación:⁴

- Transmisión directa, con los transductores en las caras opuestas del material.
- Transmisión indirecta, con los transductores en la misma cara.
- Transmisión semidirecta, con los transductores en las caras adyacentes.

Colocar y presionar las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando sea obtenido un valor mínimo de lectura como variación de +/- 1%.⁴

3.2.1.3.5. Resultados.

La velocidad de propagación de la onda se calcula con la siguiente expresión:⁴

$$v = l / t$$

Donde: v = Velocidad de Propagación

l = Distancia entre los Puntos de Acoplamiento

t = Tiempo de recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.





Los resultados deben tener las siguientes informaciones: ⁴

- Localización en la estructura e identificación de la zona de concreto
- Distancia entre las superficies de contacto de los transductores durante el ensayo.
- Dirección de la propagación de la onda
- Indicación de la posición relativa de los transductores.
- Velocidad de propagación.

3.2.1.3.6. Criterios de Evaluación

Es posible expresar la homogeneidad del concreto en forma de parámetros estadísticos, tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto hechas en los puntos de la malla. ⁴

Con todo, tales parámetros solo pueden ser usados para comparar variaciones en la composición de concretos similares, debiendo ser considerados los siguientes factores: ⁴

- Distancia entre las superficies de contacto de los transductores.
- Posición de la armadura, principalmente en el sentido de propagación de la onda.
- Densidad del concreto, que depende del trazo y de las condiciones de fabricación.
- Tipo y densidad y otras características de los agregados.
- Tipo de cemento y grado de hidratación.
- Dirección de ensayo de la pieza.
- Edad del concreto.

Existen varios criterios de evaluación, uno de ellos puede ser: ⁴

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN	CALIDAD DEL CONCRETO
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

3.2.1.4. Esclerometría.

3.2.1.4.1. Objetivo.

Evaluar la dureza superficial del concreto mediante el uso del esclerómetro de reflexión.





3.2.1.4.2. Definiciones.

El ensayo esclerométrico es un método no destructivo que mide la dureza superficial del concreto, proporcionando elementos para la evaluación de la calidad del mismo en su estado endurecido.⁴

El índice esclerométrico (IE) es el valor obtenido a través de un impacto del esclerómetro de reflexión sobre un área de ensayo, proporcionado directamente por medio del aparato, medido como el número de rebote del martillo.⁴

3.2.1.4.3. Equipo y Materiales.

- Esclerómetro de Reflexión.
- Disco de piedra abrasiva de carburo para remover la capa superficial de muy poco espesor (2mm), que es la más dura y por lo tanto no sería representativa del resto del concreto.⁴

3.2.1.4.4. Campo de Aplicación.

- a) El método esclerométrico no debe ser considerado sustituto de otros métodos, si no como un método preliminar para formarse una idea de la calidad del concreto.
- b) Los métodos esclerométricos proporcionan informaciones en relación a la dureza superficial del concreto y hasta 20mm de profundidad, en el caso de esclerómetro de energía de percusión alrededor de 2.25 Nm.
- c) Este método proporcionan además una buena medida de la dureza superficial del concreto. Las correlaciones con las demás propiedades del concreto son determinadas empíricamente o verificadas a través de otros ensayos específicos.
- d) Los métodos esclerométricos deben ser empleados en las siguientes circunstancias:⁴
 - Determinación de la uniformidad de la dureza superficial del concreto.
 - Comparación de concretos como una referencia.
 - Casos en los que se desea comparar la calidad de piezas de concreto.
 - Como un recurso más de control de calidad de piezas prefabricadas.
 - Estimación de la resistencia a compresión del concreto.
 - El fabricante del aparato debe proporcionar junto con el instrumento, un gráfico correlacionando la resistencia a la compresión con especímenes contra en número de rebote (índice esclerométrico).⁴

3.2.1.4.5. Procedimiento.

La Figura 3.6 muestra el diagrama de flujo para el procedimiento a seguir en la evaluación de la dureza superficial del concreto.⁴



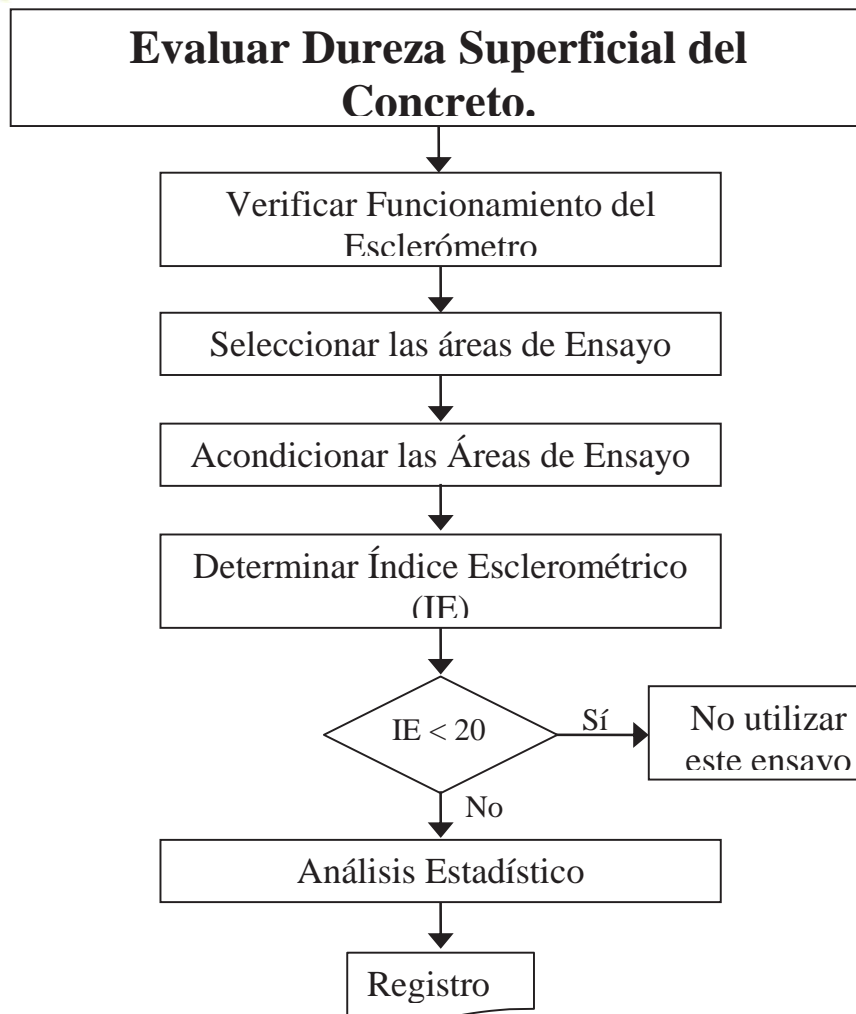


Figura 3.6. Procedimiento a seguir para la Evaluación de la Dureza Superficial del Concreto.⁴

El esclerómetro debe ser verificado antes de su utilización a cada 300 impactos realizados en una misma inspección, siguiendo las instrucciones del fabricante del equipo para la utilización del Yunque de Ensayo.⁴

Las superficies del concreto deben estar secas, limpias y preferencialmente planas, evitándose superficies húmedas y carbonatadas.⁴

Las áreas de ensayo deben estar:⁴

- Localizadas en las caras verticales.
- Alejadas de regiones afectadas por segregación, exudación, concentración excesiva de armadura, juntas.
- Alejados por lo menos 60mm de los cantos o aristas de los elementos.
- Tener una superficie entre 800 mm² (090*90mm) y 40mm² (200*200mm).





Frecuentemente el número de impactos está limitado por la separación de las barras de refuerzo. Sin embargo es recomendable:⁴

- Efectuar un mínimo de 9 impactos en cada área de ensayo.
- Evitar impactos sobre agregados, armaduras.
- No debe permitir más de un impacto sobre un mismo punto.
- Distancia mínima entre impactos de 30mm.

Limitaciones.

Los esclerómetros de reflexión no deben ser utilizados cuando los índices esclerométricos son inferiores a 20.⁴

Utilización del Esclerómetro.

- El esclerómetro de reflexión debe ser siempre aplicado ortogonalmente sobre el área de ensayo.
- La barra de percusión debe ser presionada contra un punto del área de ensayo, previamente delimitada y, antes de que dicha barra desaparezca completamente en el cuerpo del esclerómetro, el martillo debe ser liberado.
- La liberación del martillo debe ser efectuada a través de un aumento gradual de presión en el cuerpo del aparato.
- Después del impacto, la punta indicadora localizada en la escala del esclerómetro proporciona directamente el índice esclerométrico. Este puede ser fijado por medio del botón de presión, para permitir una lectura más segura en áreas de poca luminosidad o en posiciones de difícil acceso.
- El esclerómetro debe ser aplicado preferiblemente en posición horizontal y consecuentemente sobre superficies verticales. Cuando sea necesario aplicarlo en posiciones diversas, el índice esclerométrico debe ser corregido con los coeficientes proporcionados por el fabricante de esclerómetro.⁴

3.2.1.5. Profundidad de Carbonatación.

3.2.1.5.1. Objetivo.

Determinar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con solución de indicador ácido-base.⁴

3.2.1.5.2. Definiciones.

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12 - 14) del concreto por efecto del CO₂ que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO₂ reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio) neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10.⁴





3.2.1.5.3. Equipo y Materiales.

- Instrumentos de medición: escala milimétrica, vernier, etc.
- Herramientas para la extracción de muestras: piquetas, taladros, etc.
- Material para limpieza superficial: brocha, trapos, etc.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (1 gr. fenolftaleína + 49 gr. alcohol + 50 gr. Agua) o timolftaleína (1gr timolftaleína + 99gr agua).⁴

3.2.1.5.4. Procedimiento.

El diagrama de flujo del procedimiento se muestra en la Figura 3.7.⁴

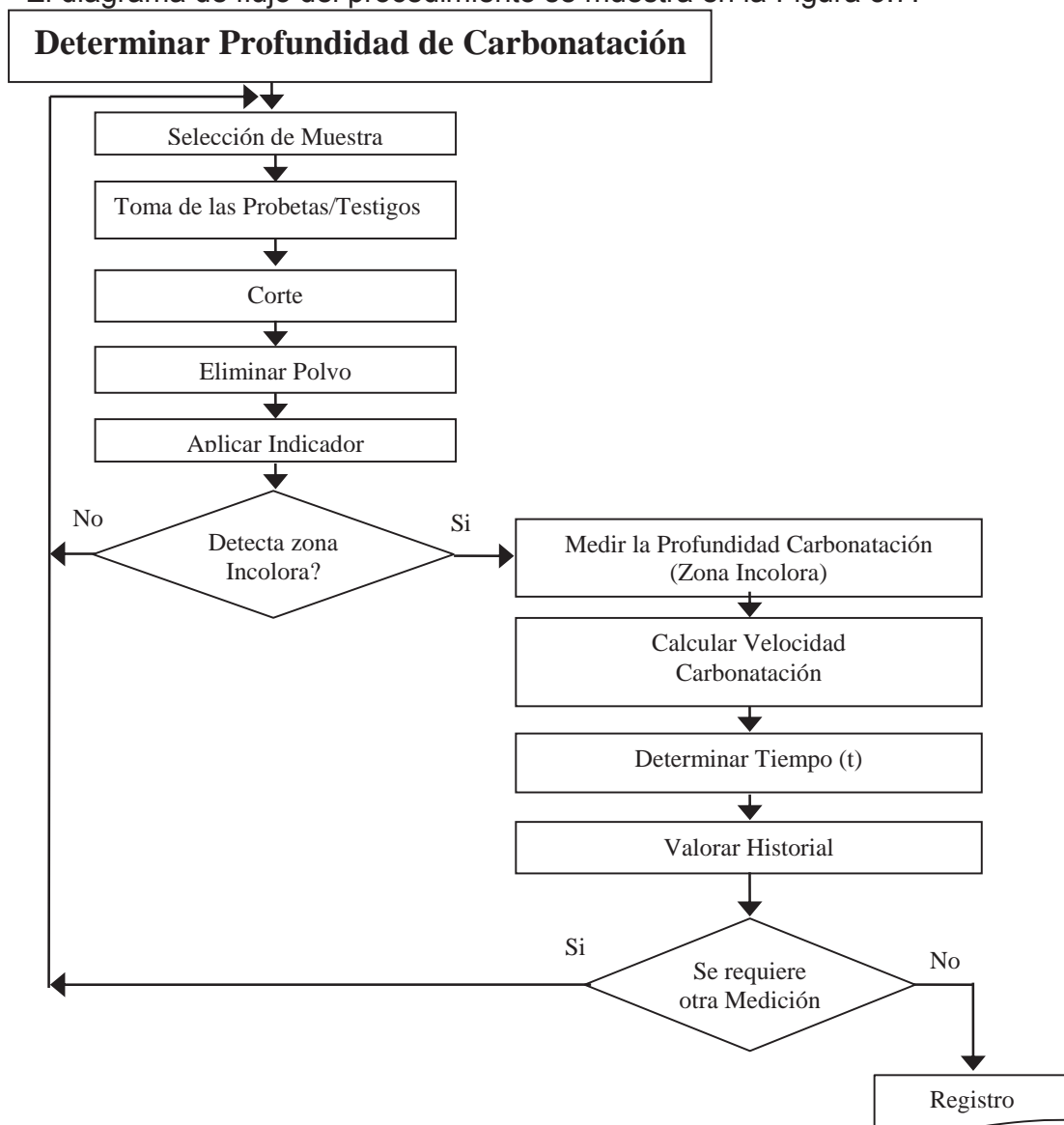


Figura 3.7. Diagrama de Flujo donde se indica como Determinar la profundidad de Carbonatación y el Tiempo para alcanzar la armadura.⁴





a. Toma de Testigos.

La sección será un corte transversal donde un extremo corresponderá a la superficie expuesta a la atmósfera. La probeta/testigo puede ser cilíndrica o una porción extraída. El tiempo de exposición de la superficie a evaluar no podrá ser mayor de 15 minutos (fractura fresca).⁴

En caso de que no pueda extraerse un testigo o porción, se procederá a taladrar una o varias secciones manual o mecánicamente hasta la profundidad de interés, dejando el lugar libre de material suelto y polvo, lo cual expondrá la superficie para el análisis.⁴

b. Determinación de la Profundidad de Carbonatación.

Una vez seleccionada la probeta y estando su superficie libre de polvo, se aplicará por atomización el indicador ácido-base en forma uniforme.⁴

Luego de la aplicación, antes de transcurrido 15 minutos, se efectuará la medición de la longitud (profundidad) de la zona incolora desde la superficie, determinándose con precisión los valores máximos/mínimos del frente incoloro y la media aritmética, de un mínimo de medición, en función del tamaño de la probeta. El procedimiento no deberá tardar más de 20 minutos.⁴

Deberá levantarse un registro preciso sobre la ubicación de las probetas/testigos, tonalidad visualizada, profundidad de carbonatación medida e indicar explícitamente el tipo de indicador utilizado. Igualmente se efectuará un registro fotográfico donde sea posible.⁴

3.2.1.5.5. Criterios de Evaluación.

a. Nivel de pH.

En función del indicador ácido-base seleccionado se establecerá el pH del frente incoloro en la muestra.⁴

La fenolftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango de viraje está entre pH 8.2 y pH 9.8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

La timolftaleína es otro indicador que podrá utilizarse, ya que su rango está entre pH 9.3 y pH 10.5 con tonalidad de incolora a azul.⁴

b. Cálculo de la Velocidad de Carbonatación.

Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de carbonatación del concreto armado es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.⁴





$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \sqrt{t}$$

Donde: t = Tiempo en años.
 K_{CO_2} = Constante de Carbonatación, $\text{mm.año}^{-0.5}$
 X_{CO_2} = Profundidad de Carbonatación, mm.

Con los resultados de una determinación de profundidad de carbonatación es posible predecir la progresión de la misma y el tiempo en el cual la carbonatación alcanzara el refuerzo del concreto si se conoce la profundidad de este.⁴

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t_0}} \quad ; \quad t = \left(\frac{e_c}{K_{CO_2}} \right)^2$$

Se calcula la constante K_{CO_2} de la primera determinación y el tiempo en que ocurrió la carbonatación. Se utiliza esa constante junto con la profundidad de la armadura e_c y se determina en cuanto tiempo la carbonatación alcanzara la armadura.⁴

Este modelo no debe ser aplicado directamente a estructuras con menos de 3 años de vida, en cuyos casos se recomiendan dos o más medidas con un intervalo mínimo de 6 meses. Siempre es recomendable hacer más de una evaluación para aumentar la certeza de la información obtenida para poder predecir el comportamiento de la carbonatación, con un desfase de al menos 6 meses.⁴

Adicionalmente, se ha indicado que valores de K_{CO_2} de 2 a 3 $\text{mm/año}^{0.5}$ (en función de recubrimiento) pueden ser considerados como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación mientras que valores de $K_{CO_2} > 6$ $\text{mm/año}^{0.5}$ indican concretos de muy baja resistencia.⁴

3.2.1.6. Concentración de Cloruros.

3.2.1.6.1. Objetivo.

El objetivo de este ensayo es la determinación de la concentración de cloruros, totales y libres, presentes en la masa del concreto a diferentes niveles de profundidad, resultados que permiten el cálculo del coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior y con ello la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Esta información, interrelacionada con otras variables, permite analizar el estado actual de la estructura y también permite estimar el tiempo que tardara este ion en alcanzar el refuerzo.⁴





3.2.1.6.2. Definiciones.

Cloruros Libres. Son los solubles en agua y estos son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo al alcanzar niveles críticos y causar su despasivación.⁴

Cloruro Enlazado. Este es el cloruro combinado a las diferentes fases o compuestos de la pasta de cemento, de los cuales el principal es el aluminato tricálcico.⁴

Cloruros Totales. Están representados por la sumatoria del cloruro enlazado y el cloruro libre.⁴

Coefficiente de Difusión Aparente (Dap). Coeficiente obtenido por ajuste de la ecuación en el apartado 2.2.4.11 del Capítulo 2, al perfil de cloruros determinado en concreto. Este permite conocer la resistencia a la penetración del cloruro en el concreto. También se puede estimar el tiempo aproximado en el cual estos iones llegan a nivel de la armadura en cantidad suficiente para inducir su corrosión.⁴

3.2.1.6.3. Materiales y Equipo.

a. De Carácter General.⁴

- Equipo de Molturación
- Estufa de 0 a 150 °C
- Tamices No. 20 y 200 ASTM
- Balanza Analítica de precisión.
- Plancha calefactora y agitador
- Probeta graduada de 100 mL
- Embudo de filtración
- Vaso de 250
- Matraz aforado de 250 mL y pipetas volumétricas de 5-10-20 mL (opcionales)
- Papel de filtro de porosidad media o rápida
- Reactivos: ácido nítrico, nitrato de plata y cloruro de sodio.
- Agua destilada.

b. De Carácter Particular, acorde al Método de Titulación:⁴

- Volumetría: Mohr (titulación directa con nitrato de plata estándar e indicador cromato de potasio) y Volhard (adición de un exceso de nitrato de plata estándar y titulación por retroceso con tiocianato de potasio o amonio utilizando como indicador sulfato férrico amónico hasta coloración rojiza). Se requiere una bureta de 25mL.
- Potenciometría. Requiere un titulador automático de cloruros o un equipo acoplado a electrodo de ion selectivo para cloruros.





3.2.1.6.4. Procedimiento.

- a. **Toma de Testigo.** Los testigos, como ya se indicó, se pueden extraer en piezas cilíndricas utilizando un extractor de testigos o en polvo mediante un taladro. En todos los casos debe minimizarse el número de muestras y consultar a un ingeniero estructural acerca de las zonas de muestreo, para no afectar puntos críticos de la estructura.⁴

A continuación se detallan las dos técnicas.

- **Extracción de Testigos.** El diámetro del testigo está relacionado con el tamaño del agregado grueso, recomendándose una relación de 3 a 1. Debe utilizarse la mínima agua posible en la toma de la muestra, puesto que está ocasiona pérdida de cloruros. Una vez tomado el testigo deberá identificarse correctamente y colocarlo en bolsa plástica para protegerlo del medio ambiente, así como ejecutar los ensayos en el menor tiempo posible para evitar cambios en el proceso de difusión de los cloruros.⁴

El testigo (cilíndrico) se corta con un disco de corte seco en rodajas de 5 a 10mm. Las rodajas se deben triturar antes de someterlas al análisis correspondiente. La primera puede desbastarse mm a mm cuando se considere necesario.⁴

- **Extracción de Muestra en Polvo.** El concreto se puede agujerar utilizando un martillo adecuado, acoplado con una broca o un cincel de metal duro. Así, se puede retirar el material en polvo a diferentes profundidades. Es recomendable la utilización de un equipo que acople una guía que permita llegar a la profundidad a la cual se toma la muestra. Se debe tener especial cuidado para que no se contamine una muestra con la anterior.⁴

b. **Determinaciones.**⁴

- Ensayo: la determinación de los cloruros totales puede ser efectuada con el método ASTM C-1411.
La determinación de los cloruros solubles puede ser efectuada de acuerdo con el método ASTM C-1411.
- Contenido de cloruros: el contenido de cloruros obtenido del ensayo puede expresarse referido al peso de la muestra o al peso del cemento en el concreto, para lo cual deberá conocerse la composición del mismo.
- Expresión gráfica de los resultados: el contenido de cloruros se representa gráficamente con respecto a la profundidad de la muestra, X_i , con el fin de evaluar el perfil de penetración de los cloruros hacia el interior de la estructura y comparar este con el valor límite permisible.⁴





El diagrama de Flujo del procedimiento se muestra en la Figura 3.8.⁴

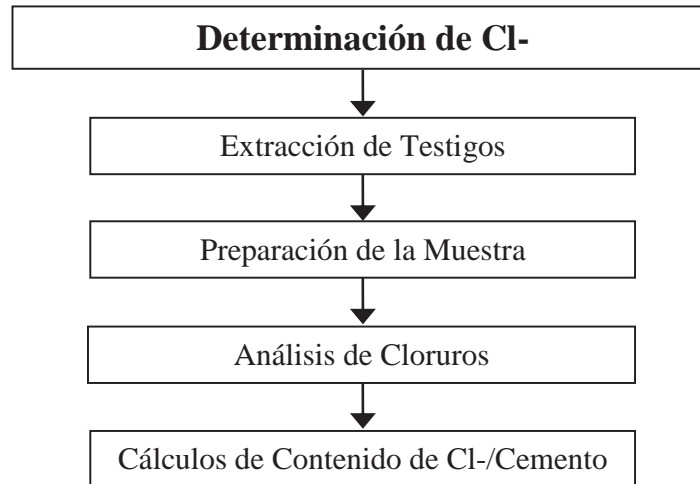


Figura 3.8. Diagrama de Flujo para la Determinación de Cloruros en Núcleos.⁴

3.2.1.6.5. Evaluación de Resultados.

Los valores del contenido en cloruro dan una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño, pero no se pueden tomar como un límite absoluto sin la interpretación basada en la experiencia del evaluador correspondiente.⁴

Las normas recomiendan adoptar como un valor límite permisible el de 0.4% de cloruros totales en relación a la masa de cemento para las estructuras de concreto armado. Para concreto pretensado y postensado el límite debe ser de 0.2%. Sobre el particular existe mucha controversia, ya que son los cloruros solubles los que causan la corrosión. Esto significa que el tipo/contenido de cemento y/o aditivos van a cambiar la relación de Cl- solubles a los totales. Por esto muchos técnicos han considerado estos valores como límite permisibles para cloruros solubles.⁴

Es importante resaltar que la concentración de cloruros, aunque supere el nivel límite, no determina por sí sola la posibilidad de riesgos de corrosión o su severidad.⁴

3.2.1.7. Resistencia a Compresión

3.2.1.7.1. Objetivo.

Determinar la resistencia a la compresión del concreto de la estructura a través de la extracción de testigos de concreto con taladros de diámetro adecuado. La resistencia a la compresión del concreto puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica.⁴





3.2.1.7.2. Definiciones.

La resistencia a la compresión del concreto corresponde a la tensión máxima (de ruptura general) de compresión axial, en MPa, que puede soportar un testigo cilíndrico de diámetro igual o superior 3 veces el Tamaño Máximo Nominal (T.M.N) del agregado. La relación entre la altura (h) y el diámetro (Φ) del testigo debería ser $h/\Phi = 2$ y deseable que nunca sea $h/\Phi < 1$, retirado de lugares estratégicos de una estructura, preparado y roto en condiciones normales de un laboratorio.

3.2.1.7.3. Equipos y Materiales.

- Agua para la refrigeración del taladro.
- Energía eléctrica o fuente de energía tipo hidrocarburo, diesel o gasolina, dependiendo de las características del taladro.
- Pacómetro u otro equipo capaz de identificar la posición de las armaduras en el componente o elemento estructural. Esa identificación puede ser hecha manualmente, a través del retiro del concreto de recubrimiento.
- Taladro eléctrico o a gasolina, con broca o copa, conforme a lo descrito en la Norma ASTM C-42.
- Disco de corte para cortar o separar los extremos de los testigos cilíndricos.
- Prensa para ensayo de compresión axial que cumpla con los requisitos de la Norma ASTM E-4.⁴

3.2.1.7.4. Procedimiento.

a. Identificación de los Lotes a Ensayar.

- Se deben elegir regiones representativas de los componentes y elementos estructurales, o sea, en columnas y muros no se recomiendan mezclar testigos extraídos del primer tercio (hasta 1m de altura) con testigos de otros dos tercios. De la misma forma testigos representativos de losas y vigas no pueden ser representativos del concreto de los pilotes, o sea, los lotes bajo análisis deben ser compuestos de trozos equivalentes de elementos estructurales compatibles y similares.⁴
- Es recomendable que el lote de concreto a ser evaluado sea homogéneo, tener la misma proporción entre los materiales, ser mezclado con los mismos materiales, haber tenido la misma consistencia cuando fresco y haber sido sometido a los mismos procedimientos de cura.⁴

b. Tamaño de la Muestra.

- Para cada lote bajo estudio se elegirá una muestra representativa.
- El número mínimo de testigos o ejemplares para constituir una muestra representativa es del orden de seis para testigos de diámetro igual o superior a 10cm.
- Para testigos de diámetro inferior a 10cm, se recomienda por lo menos una muestra de diez testigos.⁴





- En casos excepcionales de análisis de un pequeño lote, puede admitirse una muestra con apenas tres testigos.⁴

c. Dimensión de los Testigos.

- Siempre que sea posible los testigos deben guardar la relación altura/diámetro igual a dos. Puede aceptarse testigos con $h/\Phi \geq 1$ (ASTM-C-42)
- El diámetro debe ser siempre igual o superior a tres veces la dimensión del árido grueso utilizado en la confección del concreto.
- No son admitidos testigos con altura (longitud) inferior a su diámetro.⁴

d. Cuidados Durante la Extracción.

- Localizar la armadura.
- Evitar extraer o cortar acero de las armaduras.
- Apuntalar los elementos estructurales antes de la extracción, según la opinión del Ingeniero Estructural.
- Llenar los agujeros de los testigos con concreto, mortero autonivelante o morteros de resistencia compatible con la resistencia del concreto original. El material de relleno debe tener retracción compensada, su módulo de elasticidad igual o superior al del concreto original y debe tener muy buena adherencia a éste.
- No considerar testigos con vacíos o fallas, o sea, todos los testigos de la muestra para conocer la resistencia a la compresión del concreto estructural deben ser íntegros.⁴

e. Ensayo

- Cortar con disco de corte los topes de los testigos de forma de obtener una superficie perfectamente plana y ortogonal a la generatriz del cilindro. Eso puede, excepcionalmente, ser obtenido con una fuente de desbaste por lija de la superficie. Luego, éstos deben ser refrentados.
- Los testigos representativos de lotes húmedos (estructura bajo agua o reservorios y tanques) deben ser rotos húmedos. Los provenientes de estructuras al aire pueden ser rotos secos en equilibrio con las condiciones del ambiente de laboratorio.
- Se determina la tensión de ruptura directa del valor obtenido de la prensa, dividido entre el área del testigo. La resistencia a la compresión del concreto, f_c , depende de las dimensiones de los testigos y puede ser obtenida a partir de uso de coeficientes de la Tabla 3.3.⁴

Tabla 3.3. Coeficientes de Corrección de las Dimensiones de los Testigos.⁴

Relación Altura/Diámetro	Multiplicar la Tensión Directa por.
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.90
1.00	0.89





La resistencia característica estimada, $f_{ck,est}$, del concreto a la compresión puede ser calculada por: ⁴

$$f_{ck,est} \geq \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{0,9 n} \quad \text{o} \quad f_{ck,est} \geq \frac{f_{c1}}{0,8}$$

Donde:

- $f_{ck,est}$ = Resistencia característica estimada del concreto a la edad del ensayo.
- f_{ci} = Resistencia a compresión de cada testigo de la muestra, en MPa.
- n = Número total de testigos de una muestra, tamaño de la muestra.
- f_{c1} = Mínima resistencia a compresión entre los testigos de la muestra.

En los casos donde hace falta conocer la resistencia a la compresión que tenía el concreto a los 28 días de edad, hay que utilizar otros coeficientes para transportar esa resistencia a la edad deseada, que depende del tipo de cemento, de la relación agua/cemento, de las condiciones de curado, de la temperatura, de la historia de carga del elemento estructural y de otras variables menos importantes. ⁴

El diagrama de flujo del procedimiento a seguir se muestra en la Figura 3.9. ⁴

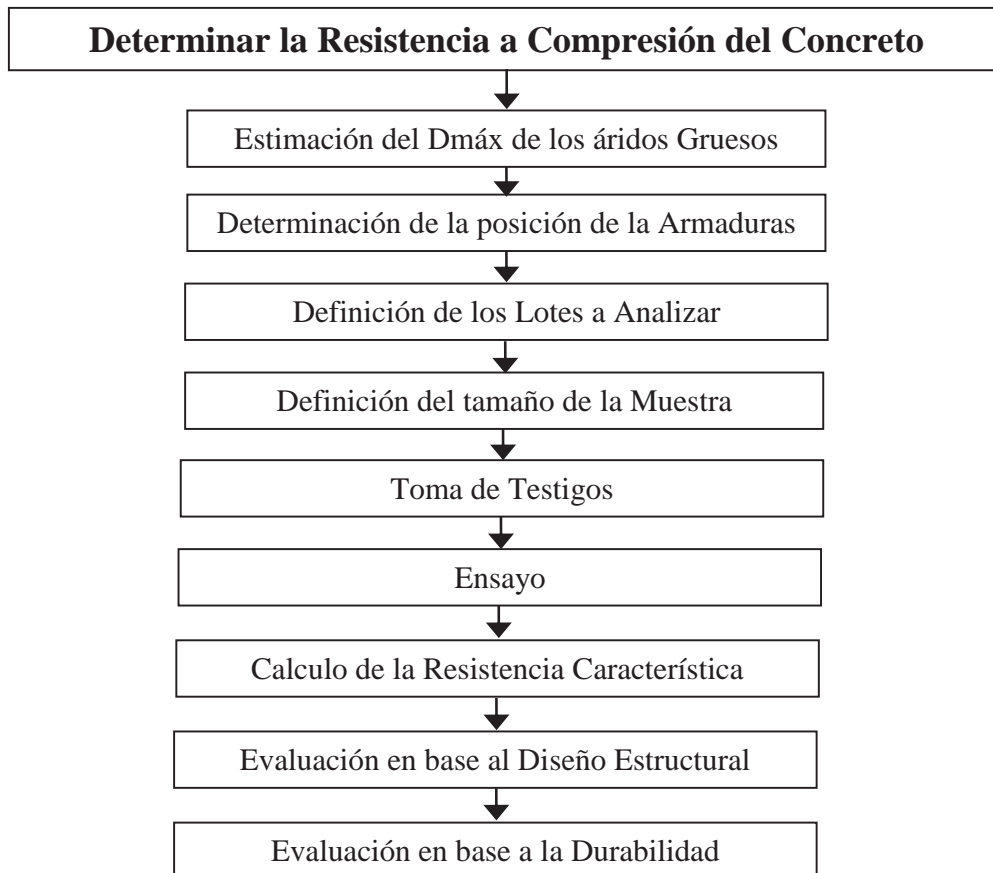


Figura 3.9. Diagrama de Flujo para la estimación de la resistencia a la Compresión del concreto. ⁴





3.2.1.7.5. Criterio de Evaluación de Resultados.

- a. **Con base en el Diseño Estructural:** $f_{ck,est}$ debe ser mayor o igual a la resistencia a la compresión característica del concreto especificada en el diseño estructural. O sea $f_{ck,est} > f_{ck}$.
- b. **En base a la Durabilidad:** el valor de la resistencia mecánica, por si solo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación a/c, la dosificación, el tipo de cemento, el espesor de recubrimiento de la armadura, etc. Sin embargo, en general se acepta que concretos de elevada resistencia (>45 MPa) son durables y que concretos por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad.⁴

3.2.1.8. Porosidad.

3.2.1.8.1. Objetivo.

Determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de su compacidad.⁴

3.2.1.8.2. Definiciones.

Como porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de concretos y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:⁴

- **Poros se Gel:** Son de menor tamaño (<15 - 25 Å) y corresponden a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros solo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades < 20%.⁴
- **Poros Capilares:** Son de forma variable y tamaño del orden de 2nm a 1µm. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad.
- **Poros de Aire:** Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectadas entre si y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05mm. Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos beneficiosos.⁴

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agresivos ambientales.⁴





3.2.1.8.3. Equipos y Materiales.

- Estufa.
- Cubeta de fondo plano y con tapa.
- Esponja.
- Resina Epoxi o parafina.
- Balanza.
- Especímenes de Ensayo.

3.2.1.8.4. Procedimiento.

- a. **Ensayo de Absorción Capilar.** La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Fagerlund y es base de la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de 3 coeficientes: m (Resistencia a la Penetración del Agua), K (Coeficiente de absorción Capilar) y ε_e (Porosidad efectiva). El ensayo se realiza sobre especímenes de espesor $H \leq 50$ mm (recomendándose de 20 a 30 mm para concretos especiales), luego de un pre-acondicionamiento de secado a 50°C por 48 horas (hasta peso constante) y posterior enfriamiento en desecador. Luego de registrar su peso inicial, W_0 , la muestra es colocada sobre una esponja húmeda en el interior de una cubeta de fondo plano, teniendo cuidado de que el nivel del agua solo llegue a 3mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo. Se recomienda previamente cubrir con reina o parafina las áreas laterales curvas del espécimen y a lo largo del ensayo mantener cubierto el recipiente para evitar evaporación. El cambio de peso ($W_t - W_0$) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen (A) se registra a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 25, 48... horas.⁴

Los coeficientes se calculan en base a las siguientes ecuaciones:⁴

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\text{s/m}^2)$$

Donde z representa la profundidad de la penetración de agua al tiempo t .⁴

$$k = \frac{(W_t - W_0) / A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2})$$

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$





El coeficiente k puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_o)/A$ en función de $(t)^{1/2}$.⁴

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$.⁴

Con la anterior información la Sorción Capilar, S , se calcula como:⁴

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ o } (\text{m/s}^{1/2})$$

- b. **Ensayo de Absorción de Agua (% de Absorción Total)**. Aunque las normas recomiendan el uso de especímenes de diámetro y espesor de 75mm, pueden ser utilizados especímenes de otras dimensiones. Estos se someten a un pre-acondicionamiento de secado a 105 °C por 72 horas (o menos, hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador durante 24 horas, aunque es más conveniente usar un secado a 50 °C con el fin de no dañar el gel de cemento. Luego de pesada la probeta, W_o , se sumerge en agua cuyo nivel debe estar 25 +5mm por encima del nivel superior de la probeta. Al cabo de 30 minutos se retira, se seca el agua exterior y se pesa nuevamente W_f . El agua absorbida se expresa en porcentaje, según:⁴

$$\%. \text{ Agua Absorbida} = \frac{(W_f - W_o)100}{W_o}$$

Este ensayo difiere del anterior en que no se asegura un completo llenado de la red de capilares.⁴

- c. **Ensayo de Porosidad (Porosidad Total)**. Este ensayo puede efectuarse de manera independiente, es decir sobre especímenes separados o, en probetas utilizadas en los ensayos anteriores. En cualquiera de los casos, el espécimen luego de pre-acondicionado se sumerge en agua totalmente durante 24 horas mínimo, al cabo de las cuales se registra su peso fuera (saturado de agua) y dentro de agua (sumergido en agua). Este último peso se determina con ayuda de una balanza hidrostática. Finalmente, el espécimen se seca a 105 °C hasta un peso constante y se registra su peso.⁴

La porosidad total se expresa en porcentaje, así:⁴

$$\%. \text{ Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^\circ\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} * 100$$





Este valor de la porosidad no contiene más de una mínima parte de los poros de aire. Por lo tanto, si se quiere obtener la porosidad total se debe saturar totalmente el espécimen, hervir este varias horas y luego proceder a enfriarlo lentamente antes de registrar su peso "saturado" o, bien hacer vacío en la cámara donde se tiene sumergida la probeta.⁴

El diagrama de flujo en la Figura 3.10 muestra el procedimiento simplificado para la determinación de estas propiedades.⁴

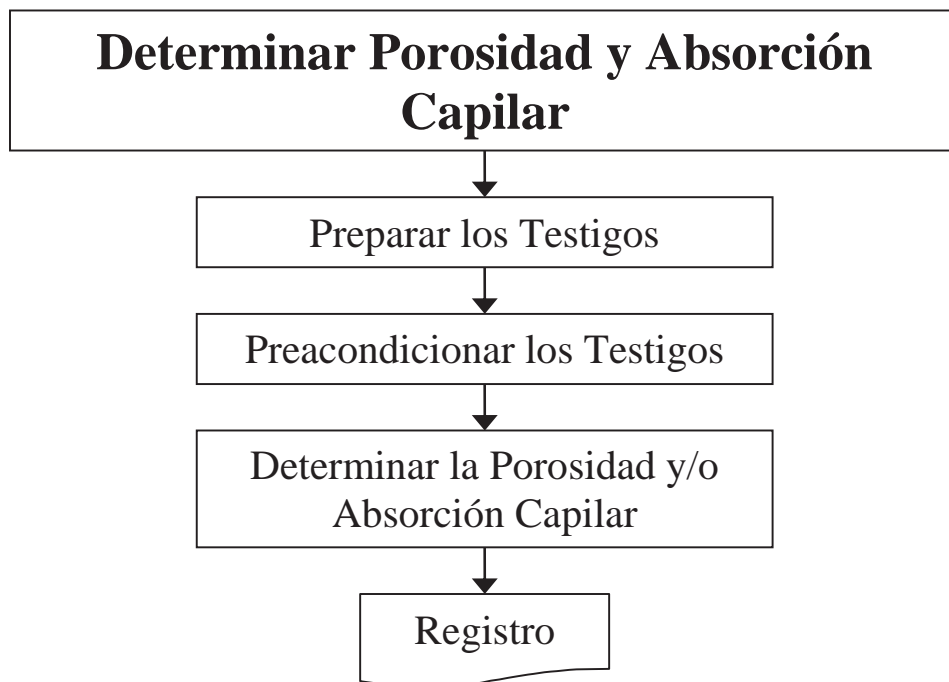


Figura 3.10. Diagrama de Flujo para la determinación de la porosidad y Absorción Capilar.⁴

3.2.1.8.5. Criterios de Evaluación.

- Para espesor de recubrimiento de 30mm en ambientes severos se recomiendan concretos con sorción capilar $S \leq 3 \text{ mm} / \text{h}^{1/2}$ ($5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$); en medios menos severos puede ser hasta $6 \text{ mm} / \text{h}^{1/2}$ ($10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente.⁴
- En cuanto al porcentaje de Porosidad:⁴

$\leq 10\%$	Indica un concreto de Buena Calidad y Compacidad.
10% - 15%	Indica un Concreto de Moderada Calidad
> 15%	Indica un Concreto de Durabilidad Inadecuada





3.2.2. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA ARMADURA.

3.2.2.1. Determinación de la Profundidad y Localización de la Armadura.

3.2.2.1.1. Objetivo.

Definir la ubicación de la armadura embebida en concreto armado y determinar la profundidad de esta desde la cara exterior del elemento. ⁴

3.2.2.1.2. Definiciones.

El recubrimiento, estructuralmente, se refiere al espesor de concreto medido desde la superficie más externa de la armadura principal hasta la cara externa del elemento. El espesor de concreto libre desde la superficie de la armadura mas externa hasta la cara del elemento se define como Capa de Protección. ⁴

3.2.2.1.3. Equipos y Materiales.

- Pacómetro (digital o analógico)
- Regla metálica de 2 metros.
- Barras de marcador indeleble.
- Formatos para información de Campo. ⁴

3.2.2.1.4. Procedimiento.

- Información Preliminar.** Antes de iniciar la actividad de Campo se debe disponer de los planos definitivos de la estructura a estudiar, donde se indique con precisión la ubicación de la armadura, los diámetros de las barras y el espesor del recubrimiento. También es necesario conocer la posición y características de otros elementos metálicos embebidos en el concreto. ⁴
- Localización de la Armadura.** Procede a localizar la armadura realizando un barrido rápido con el sensor del pacómetro en sentido perpendicular a la dirección tentativa de la armadura, de manera que el eje mayor del sensor sea paralela a la armadura hasta observar un pivoteo de la aguja (pacómetro analógico). ⁴

Luego se invierte lentamente el barrido en la misma dirección hasta encontrar la máxima deflexión de la aguja que indicara la posición del acero. Luego, para la ubicación definitiva de la armadura se hará girar el sensor pivoteándola con centro en alguno de los extremos, hasta encontrar la deflexión máxima de la aguja, que indicara la dirección correcta de la armadura en el eje del lado mayor del sensor; este eje deberá marcarse sobre la cara del elemento con un producto indeleble.

La armadura principal será localizada de igual forma siguiendo el procedimiento anterior. ⁴





c. Determinación de la Profundidad de la Armadura.

Se determina el recubrimiento o la capa de protección, según la armadura involucrada. Para cualquiera de los casos es importante colocar, previo ajuste del dial, el sensor sobre la barra elegida en los tramos que no interfieran con otros aceros, para concentrar la respuesta magnética solo en la barra en la que se desea determinar su profundidad. La Figura 3.11 muestra el diagrama esquemático de actividades.⁴

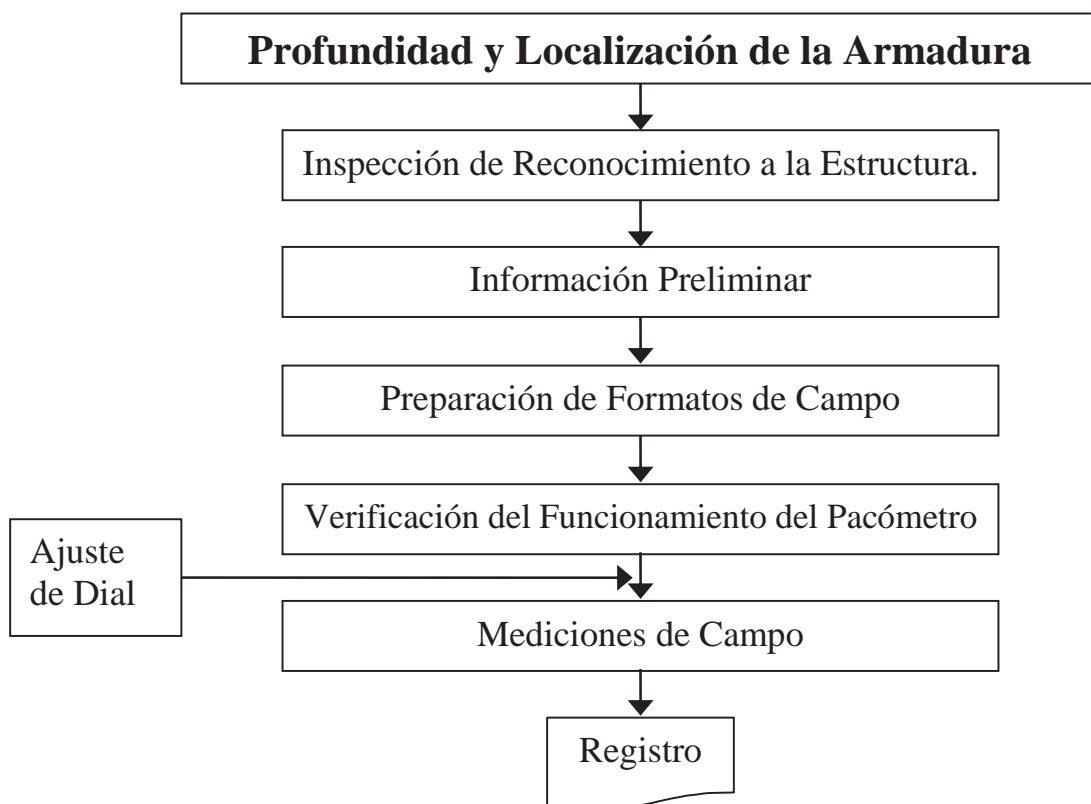


Figura 3.11. Diagrama de Flujo de Actividades para la Profundidad y Localización de la Armadura.⁴

3.2.2.1.5. Levantamiento de la Información.

Cada determinación será registrada en formatos preparados previamente al trabajo en campo, donde se registren todos los parámetros relacionados con la determinación, como por ejemplo:⁴

- Diagrama esquemático del elemento en cuestión, detallando la ubicación de las armaduras.
- Profundidad de la armadura en cada uno de los sitios seleccionados.





El uso de cuadrículas, referenciando como ejes a los aceros, permite el rápido y seguro almacenamiento de información cuando se trata de amplias superficies de trabajo. Este método resulta muy útil cuando se deben realizar mediciones electroquímicas y de toma de muestras posteriores.⁴

3.2.2.1.6. Verificación del Funcionamiento del Equipo.

Cada vez que el operador observe que se ha desviado la posición de ajuste de la aguja, deberá posicionar el pacómetro en posición cero del dial, manteniendo alejado el sensor de la interferencia de cualquier material metálico.⁴

3.2.2.2. Medición de Potenciales.

3.2.2.2.1. Objetivo.

Medir el potencial de la armadura del concreto mediante el uso de electrodos de referencia.⁴

3.2.2.2.2. Definiciones.

- a. Potencial Electroquímico. Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto.⁴
- b. Mapa de Potenciales. Son líneas de isopotencial que se dibujan sobre la superficie evaluada con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial.⁴

3.2.2.2.3. Equipo y Materiales.

- Brocha, cepillo, lima y otras herramientas para limpieza manual/mecánica de la superficie.
- Cables y conectores.
- Esponja plana, agua potable para humedecer la superficie, etc.
- Electrodo de referencia apropiado (Er). Ej: Cu/CuSO₄
- Voltímetro de alta impedancia.⁴

3.2.2.2.4. Procedimiento.

En la Figura 3.12 se muestra el diagrama de flujo del proceso.⁴



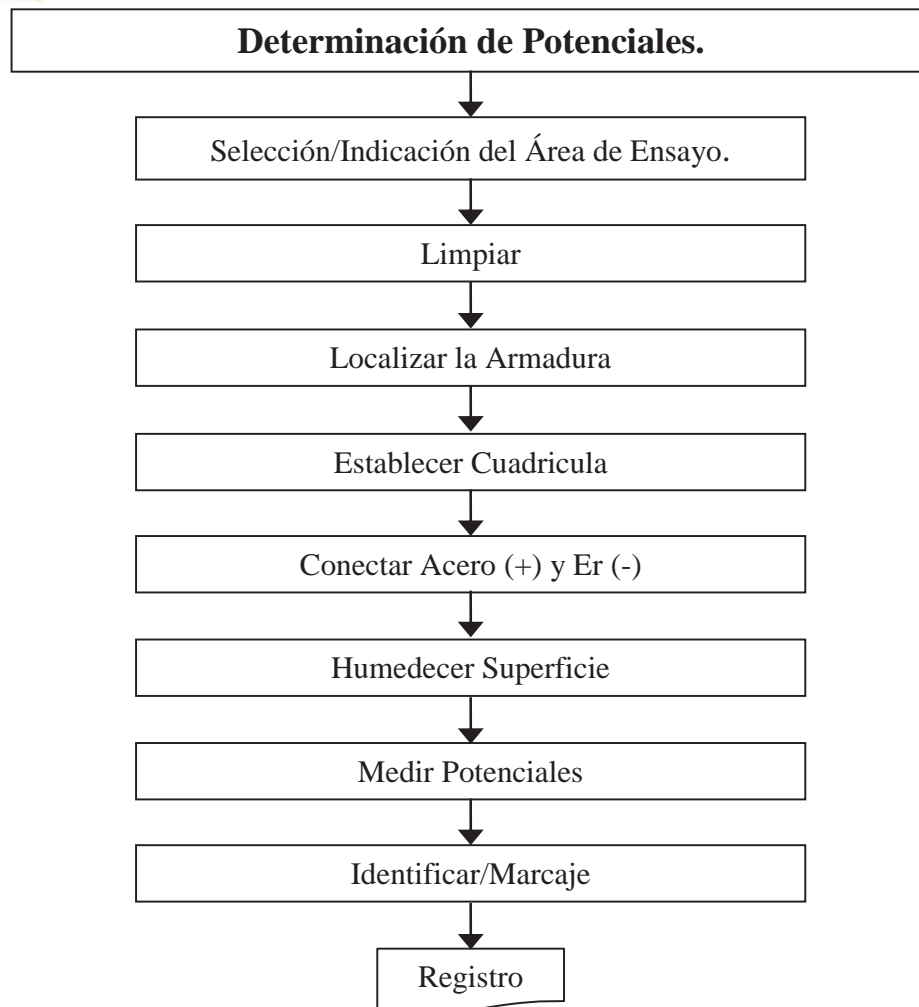


Figura 3.12 Diagrama de Flujo para la Determinación de Potenciales. ⁴

- Seleccionada la superficie a evaluar debe tenerse libre acceso a una sección de la armadura de refuerzo del concreto. En caso de no existir, debe perforarse la estructura hasta descubrir el acero de refuerzo, una vez localizado. Deberá haber garantía de continuidad eléctrica del acero al momento de efectuar las mediciones. ⁴
- Limpiar la superficie seleccionada, limpiar la superficie del acero expuesto para la conexión.
- Localizada la distribución del acero de refuerzo, trazar sobre la superficie del concreto unas cuadrículas múltiples con espaciamiento entre nodos uniformes. El espaciamiento seleccionado dependerá de la rigurosidad de la inspección y de la ubicación del refuerzo.
- Efectuar la conexión del electrodo de referencia, el negativo del voltímetro. El acero de refuerzo se conecta al dispositivo del voltímetro, como se indica en la Figura 3.13, así se leerá en la pantalla su polaridad. ⁴



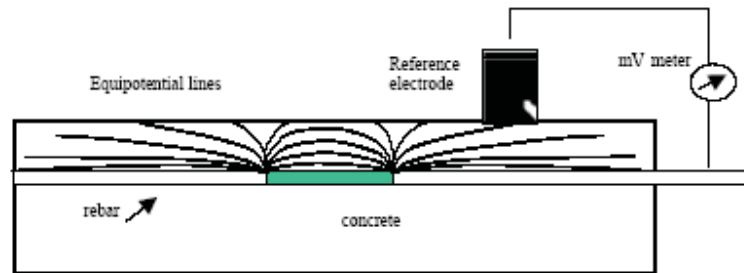


Figura 3.13. Medición de potenciales en la Armadura.

- e. Los nodos de la cuadrícula serán los puntos de referencia para la ubicación del electrodo para la medición. En estos puntos se colocara sobre la superficie del concreto una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-concreto. Colocar el electrodo sobre la esponja, efectuar y registrar la medida.
- f. Elaborar un plano de la superficie y ubicar los valores resultantes de las mediciones de potencial. Trazar las líneas de isopotenciales correspondientes hasta elaborar un mapa de potenciales.⁴

3.2.2.2.5. Criterios de Evaluación.

Las medidas de Potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la armadura de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados a la luz de la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc.⁴

Una guía referencial de las condiciones y riesgo asociados a valores de potencia se indica en la Tabla 3.4.⁴

Tabla 3.4. Criterio de Valoración de Potenciales del Acero en Concreto vs Cu/CuSO₄.⁴

CONDICIÓN	POTENCIAL (E) (ESC)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
ESTADO PASIVO	+ 0.200 a - 0.200	Ausencia de Cl- pH > 12.5 H ₂ O (HR↑)	Despreciable
CORROSIÓN LOCALIZADA	- 0.200 a - 0.600	Cl-, O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Alto
CORROSIÓN UNIFORME	- 0.150 a - 0.600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR↑)	Moderado Alto
	+ 0.200 a - 0.150	Carbonatado O ₂ , Seco, (HR↓)	Bajo
	- 0.400 a - 0.600	Cl- Elevado, H ₂ O ó Carbonatado H ₂ O, (HR↑)	Alto
CORROSIÓN UNIFORME	< - 0.600	↑Cl-, ↑H ₂ O (sin O ₂)	despreciables





3.2.2.3. Medida de la Velocidad de Corrosión.

3.2.2.3.1. Objetivo.

Determinar la Velocidad a la cual la armadura pierde sección, por corrosión de la misma.⁴

3.2.2.3.2. Definiciones.

Se llama velocidad o intensidad de corrosión (i_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día, aunque la forma usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en $\mu A/cm^2$ o, transformando este dato a partir de la intensidad del metal, en unidades de penetración (mm/año).⁴

3.2.2.3.3. Equipos y Materiales.

- a. Método. Los potencióstatos/galvanostatos son los instrumentos capaces de medir la Resistividad a la Polarización (R_p), que se relaciona con la i_{corr} a través de la fórmula de Stern y Geary.⁴

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

B: Constante (26 - 52 mV)

R_p : Ωcm^2

i_{corr} : $\mu A/cm^2$

Para ensayos de campo se aconseja el valor de 26 mV, el cual corresponde a armaduras corroyéndose.⁴

La R_p resulta de aplicar una pequeña perturbación eléctrica a las armaduras y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce. Estas perturbaciones no deben causar un cambio mayor de ± 20 mV.⁴

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0}$$

Los valores obtenidos en $\mu A/cm^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor/tiempo mediante la Ley de Faraday.⁴

$$\frac{\mu m}{año} = \frac{M}{\delta n \cdot F} \cdot i_{corr} = 11.6 \cdot i_{corr}$$





Donde: M = Masa atómica del metal.
 n = No. de electrones transferidos.
 F = Constante de Faraday (96.500 coulombios)
 δ = Densidad del Metal

La medida se puede efectuar en probetas de pequeño tamaño y área de acero conocida. Su aplicación a pie de obra exige conocer la longitud de barra sobre la que actúa la corriente. Para ello existen dos posibilidades: ⁴

a) Calcular la R_p “aparente” y aplicar las ecuaciones matemáticas desarrolladas por S. Feliu.

Existen corrosímetros comerciales para medidas in situ. Sus resultados deben ser calibrados con ensayos en laboratorio si no se tiene la garantía de su correcto funcionamiento. Estos corrosímetros miden simultáneamente el E_{corr} , la resistividad y la i_{corr} , y constan de los siguientes elementos básicos: ⁴

- Potenciostato / Galvanostato.
- Computador.
- Sensor conteniendo electrodos.
- Esponjas, cables, agua, electrodos.

b) Usar un sensor que contenga un electrodo de “guarda” monitorizado. Este procedimiento confina el campo eléctrico en una superficie determinada. ⁴

3.2.2.3.4. Procedimiento.

En las áreas de medida seleccionadas, se realiza una perforación para hacer contacto con la armadura y se sitúa el sensor sobre la superficie del concreto a través de una esponja y otro medio que asegure un buen contacto. Debido a la variabilidad propia de las medidas de corrosión, se deben adoptar criterios estadísticos de muestreo para tener un valor medio o, al menos detectar las zonas de mayor corrosión. Los criterios de muestreo se adoptan de forma similar a otros tipos de ensayo, después de haber efectuado el levantamiento de daños de la estructura y la localización correspondiente de la armadura. Como además la i_{corr} varía con el grado de humedad del concreto y la temperatura, es conveniente realizar, al menos tres medidas a lo largo de un año, con el fin de caracterizar la influencia de las distintas variaciones estacionales. A efecto de predicción se utilizara el valor medio de los datos obtenidos, a no ser que se tengan datos suficientes para efectuar la simple integración a lo largo del tiempo. ⁴





El diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.14, muestra el procedimiento a seguir.⁴

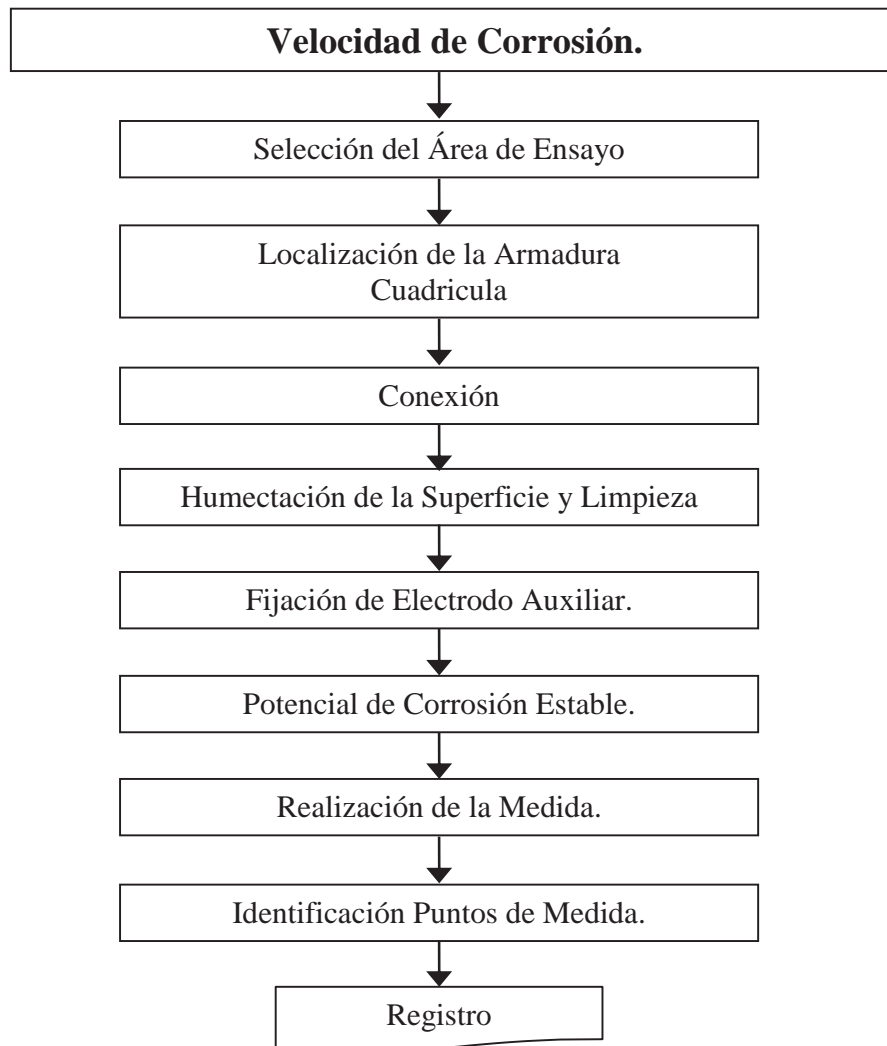


Figura 3.14. Diagrama de Flujo para la Determinación de la Velocidad de Corrosión.⁴

3.2.2.3.5. Criterios de Evaluación.

El límite entre corrosión activa y pasividad se sitúa entre $0.1 - 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, que en corrosión generalizada suponen $1 - 2 \text{ mm}/\text{año}$. Este límite se aplica cuando el proceso da lugar a la formación de herrumbre (óxidos expansivos que fisuran el recubrimiento). En el caso de que el óxido sea invisible al ojo humano, velocidades incluso de $0.5 - 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ no dan lugar a la fisuración del recubrimiento, al no tener estos óxidos carácter expansivo.⁴





Los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de 100 - 200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. A pie de obra valores por encima de 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ se detectan muy ocasionalmente y resultan valores ya elevados en términos de vida útil.⁴

Una clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil sería la siguiente:⁴

Nivel de corrosión	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{año}$
Despreciable	$< 0,1$	< 1
Baja	$0,1 - 0,5$	$1 - 5$
Moderada	$0,5 - 1$	$5 - 10$
Alta	> 1	> 10

Armaduras que se corroen a 0.1 - 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ produciendo óxidos expansivos provocaran en 10 - 20 años la fisuración del recubrimiento. Valores de 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, la producirán en 1 - 2 años.⁴

Todos estos valores se basan en considerar corrosión generalizada. Cuando la corrosión es localizada se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicando por 10 el valor medio medido. Así, para un valor de i_{corr} de 0.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (3 $\mu\text{m}/\text{año}$ de penetración homogénea) se puede calcular que en caso de ataque localizado, la máxima profundidad de picaduras será de 30 $\mu\text{m}/\text{año}$.⁴

Los valores de velocidad de corrosión se pueden utilizar también para estimar la pérdida de capacidad portante estructural.⁴

3.3. DIAGNOSTICO GENERAL DESDE EL PUNTO DE VISTA DE CORROSIÓN.

3.3.1. GENERALIDADES.

Establecer el diagnostico para un estructura resulta de un proceso lógico de análisis e interrelación de todos lo hechos, resultados y observaciones realizados en las etapas de inspección, tal como es acotado en el diagrama de la Figura 3.15.⁴



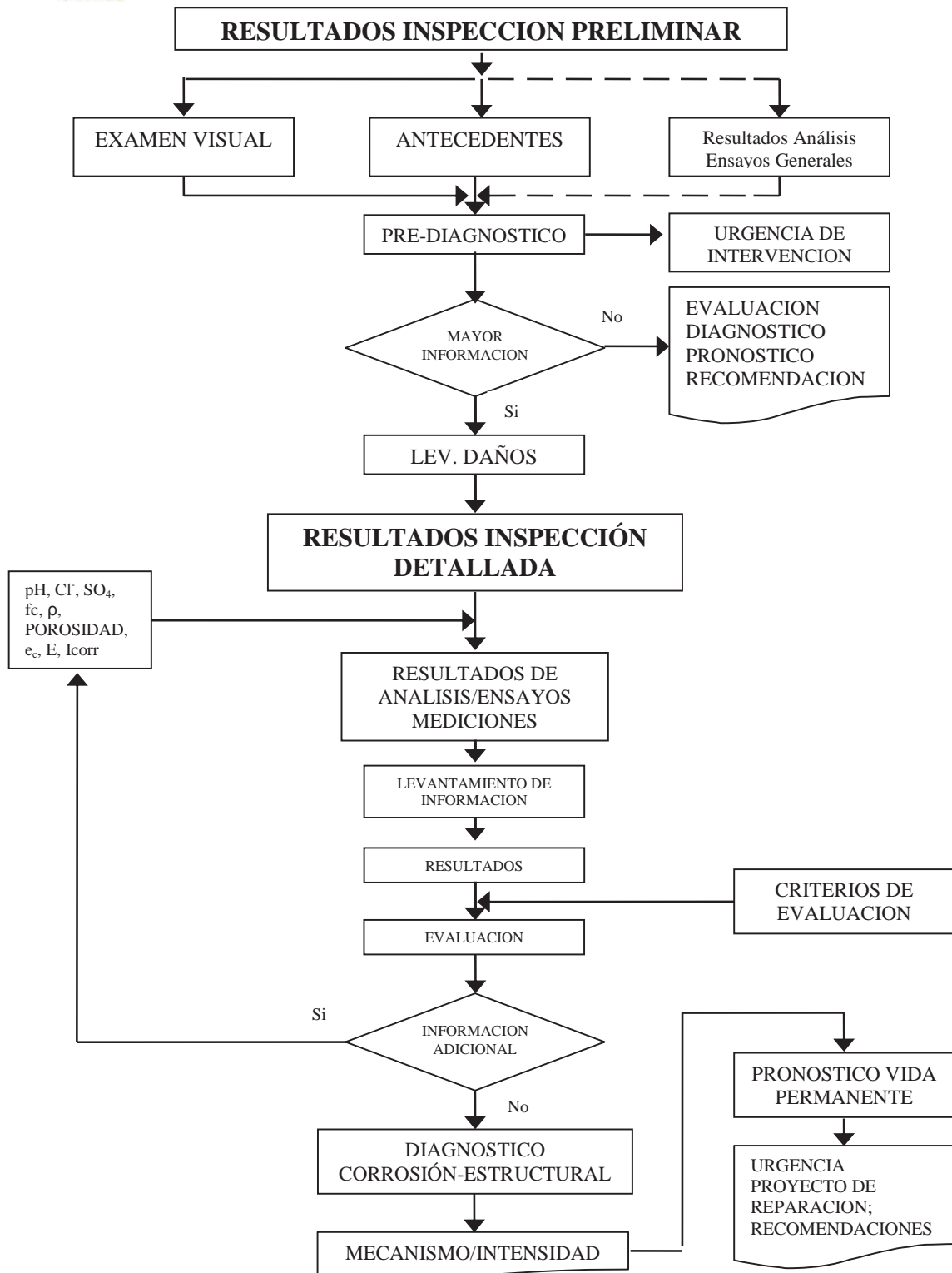


Figura 3.15. Diagrama de Flujo del Procedimiento de Evaluación de Estructuras de Concreto Armado. ⁴





3.3.2. BASES DE DIAGNOSTICO.

El diagnostico estará basado en los dos grupos de información principal establecidos en los capítulos anteriores (Figura 3.16.): información sobre el Medio Ambiental y sobre las condiciones actuales de la estructura. Sobre esta base, la información de las condiciones de la estructura deben ser examinadas en primer termino para establecer la presencia de corrosión, como para requerir reparaciones de importancia o urgentes.⁴

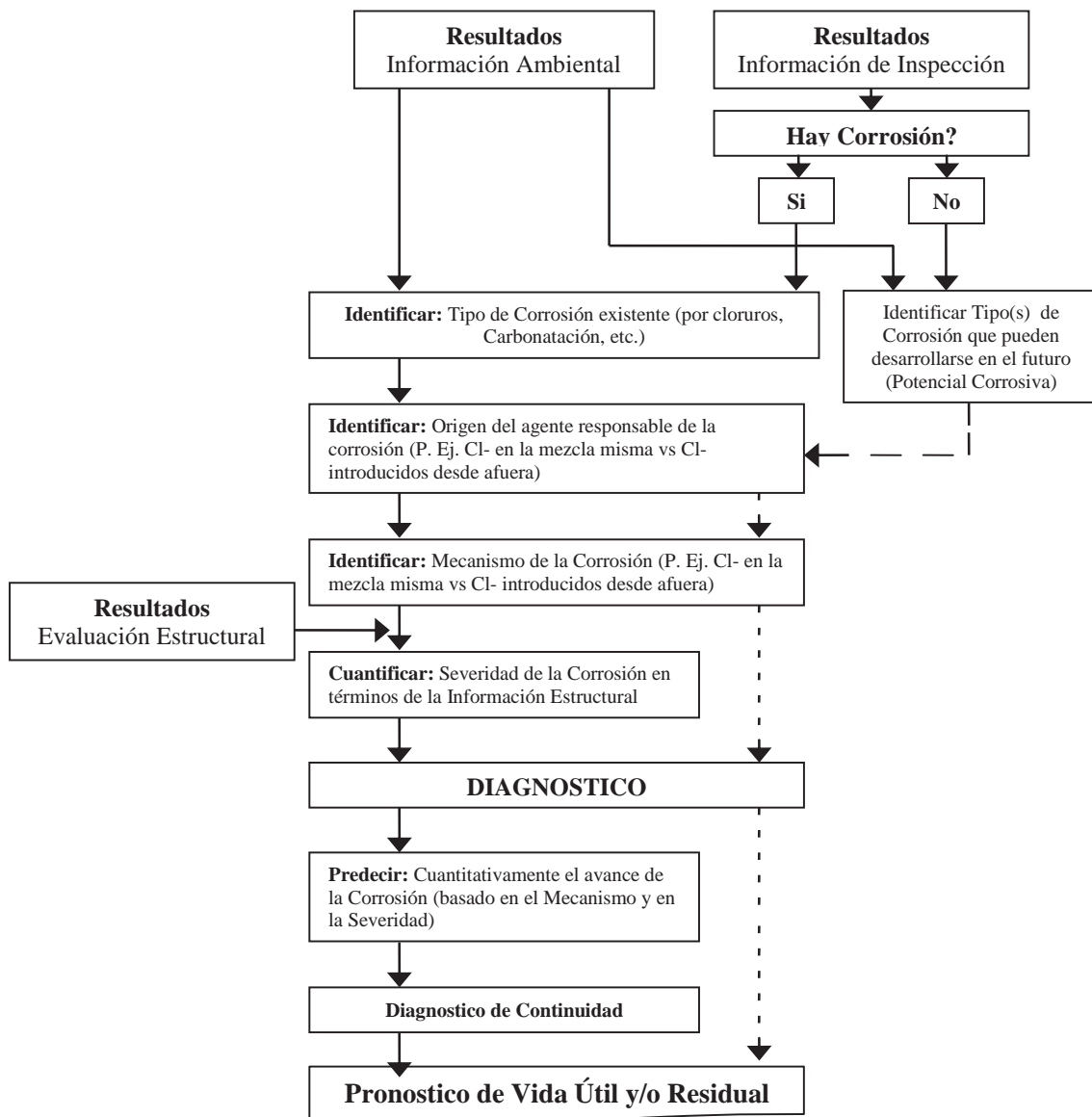


Figura 3.16. Esquema Conceptual de Pre-Diagnostico/Diagnostico.⁴





Es necesario determinar los riesgos que involucran el deterioro del elemento o estructura analizada para poder establecer, en conjunto, la gravedad y magnitud del daño y la urgencia de la reparación pertinente.⁴

Al efectuar estas evaluaciones se pueden presentar varias posibilidades, que involucran la presencia o no de corrosión de la armadura en el concreto sano o deteriorado. Las figuras 3.17 - 3.23 muestran los diagramas de flujo que presentan diferentes vías de análisis de acuerdo a los resultados de los ensayos físico-químicos y electroquímicos pertinentes, los cuales permiten concluir un diagnóstico básico que orientara al evaluador.⁴

3.3.2.1. Ausencia de Corrosión en la Armadura.

Si la información estructural no revela daños de importancia es deseable examinar la información ambiental para identificar los tipos de corrosión que puedan desarrollarse en el futuro (análisis de potencialidad corrosiva). Es de especial interés tener en cuenta el estado de estructuras similares (por ejemplo puentes en la misma zona, etc.), que ya estén demostrando deterioro y puedan servir de referencia válida para una proyección del estado en el análisis de potencialidad y diagnóstico respectivo. La información recolectada por los análisis no destructivos del tipo electroquímico serán de mayor valía y con la información que arrojen se podrá establecer la potencialidad y el diagnóstico, utilizando la ruta de análisis indicada en las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19.⁴

3.3.2.2. Presencia de Corrosión.

Si la información de las condiciones acerca de la estructura revela corrosión es necesario identificar el tipo de corrosión existente, el mecanismo de acción y de propagación. Esto se evaluará en conjunto con la evidencia estructural y ambiental para identificar las causas y el tipo de corrosión. De acuerdo a lo señalado en Capítulos anteriores. Luego, en base en los resultados de los ensayos físico-químico y electroquímicos (valorados según los diagramas de flujo presentados en las Figuras 3.17 - 3.23), será elaborado un diagnóstico.⁴



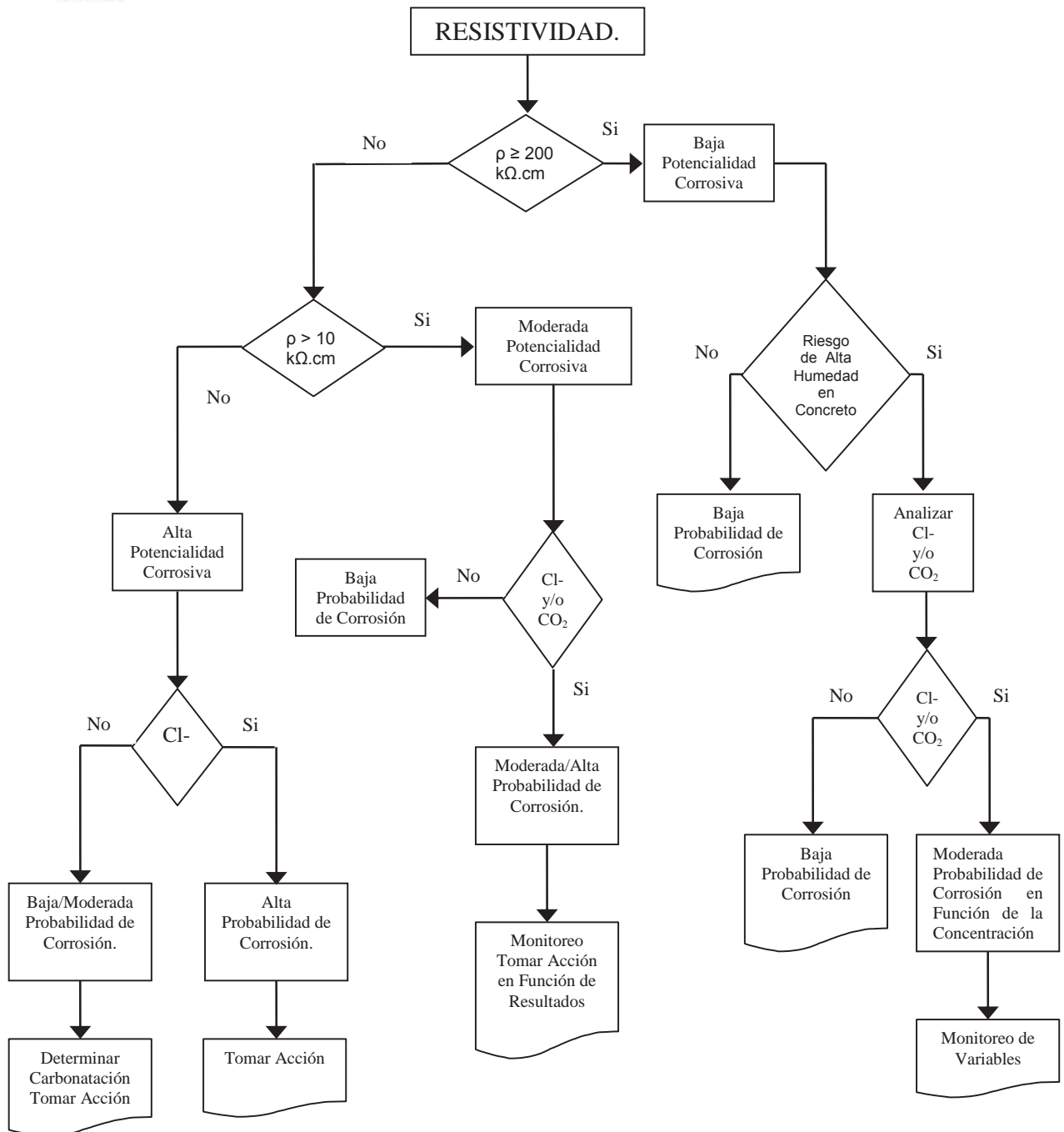


Figura 3.17. Resistividad del Concreto: Evaluación y Diagnostico. ⁴



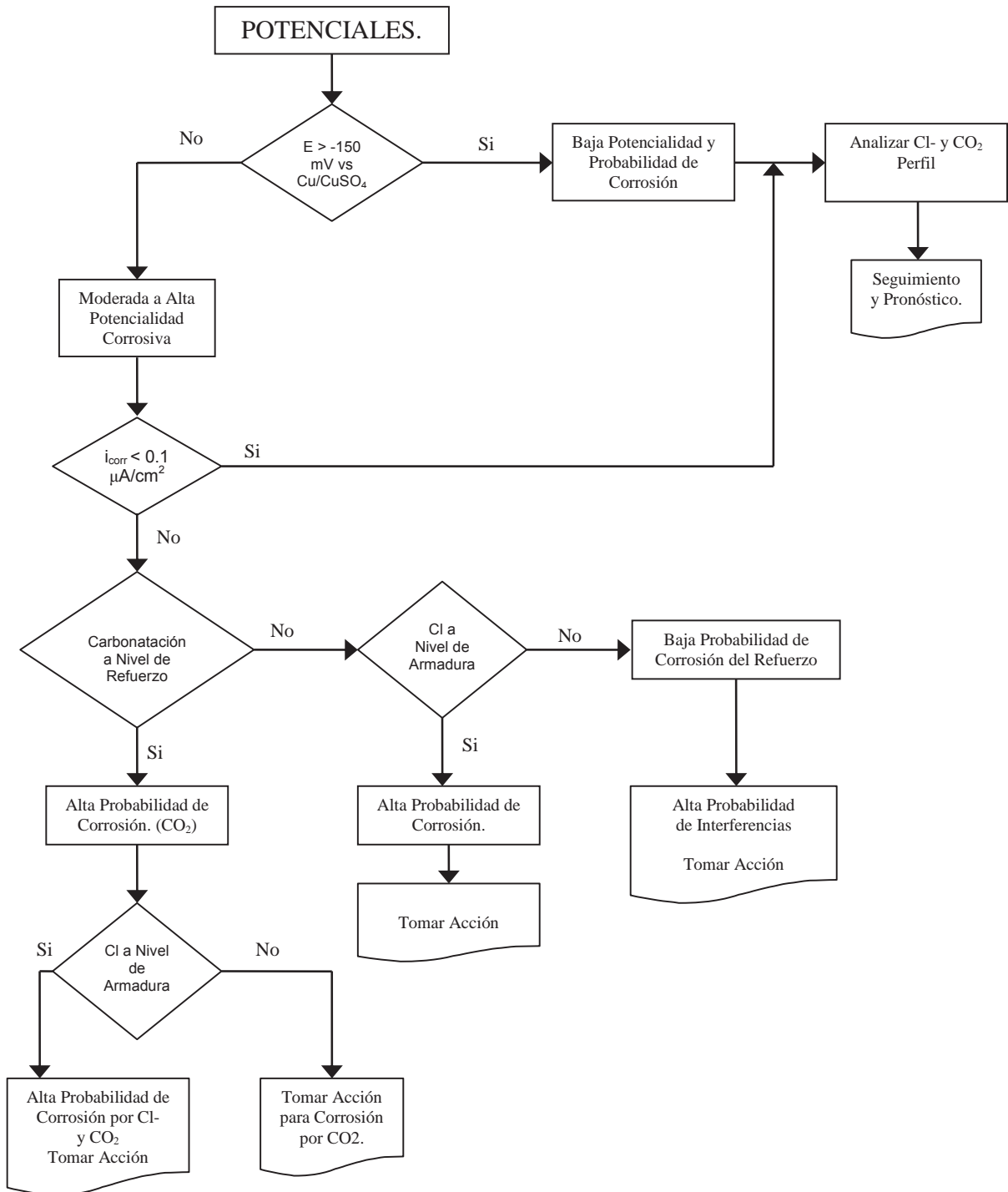


Figura 3.18. Mapeo de Potenciales: Evaluación y Diagnostico. ⁴



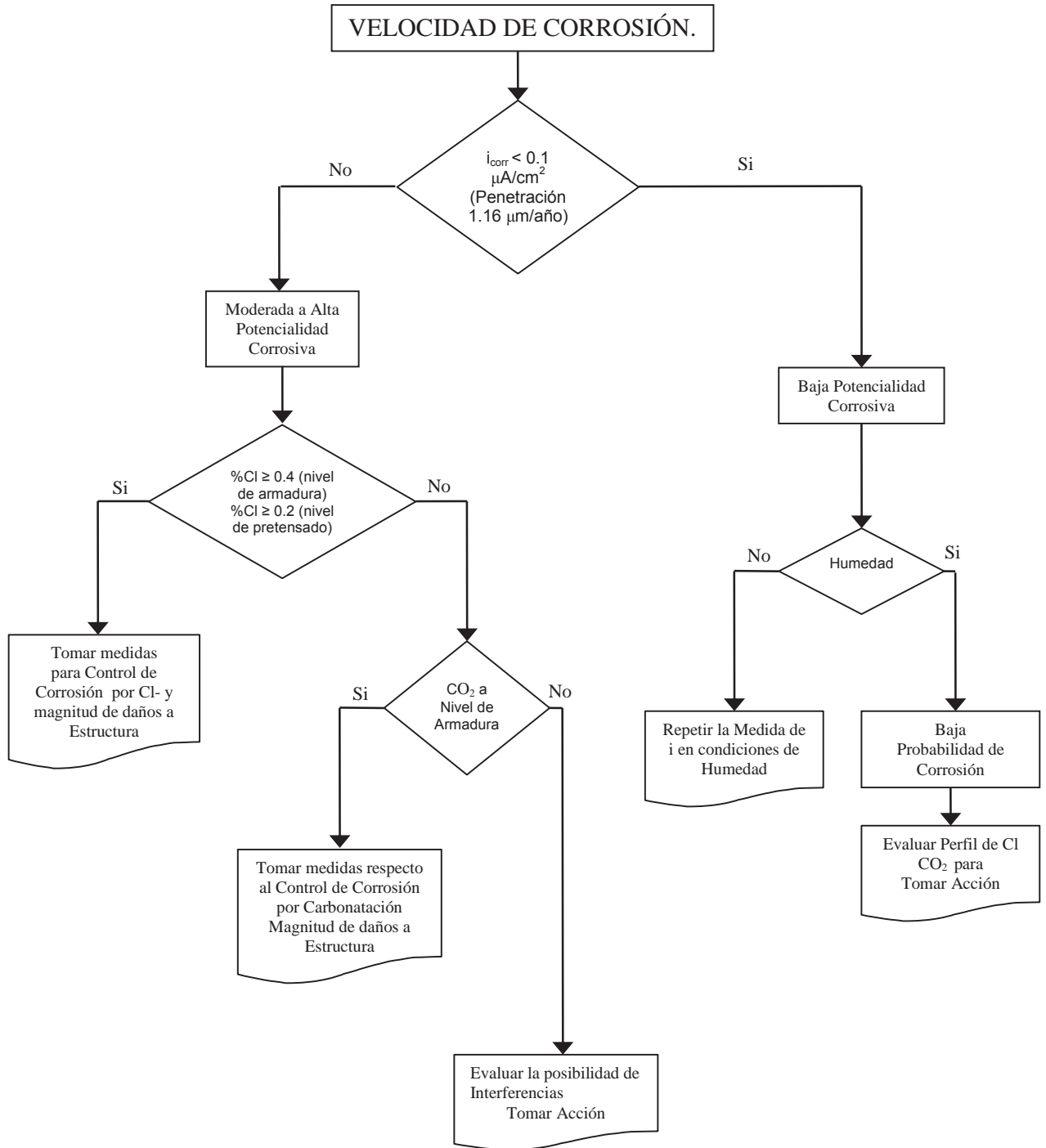


Figura 3.19. Velocidad de Corrosión: Evaluación y Diagnostico. ⁴



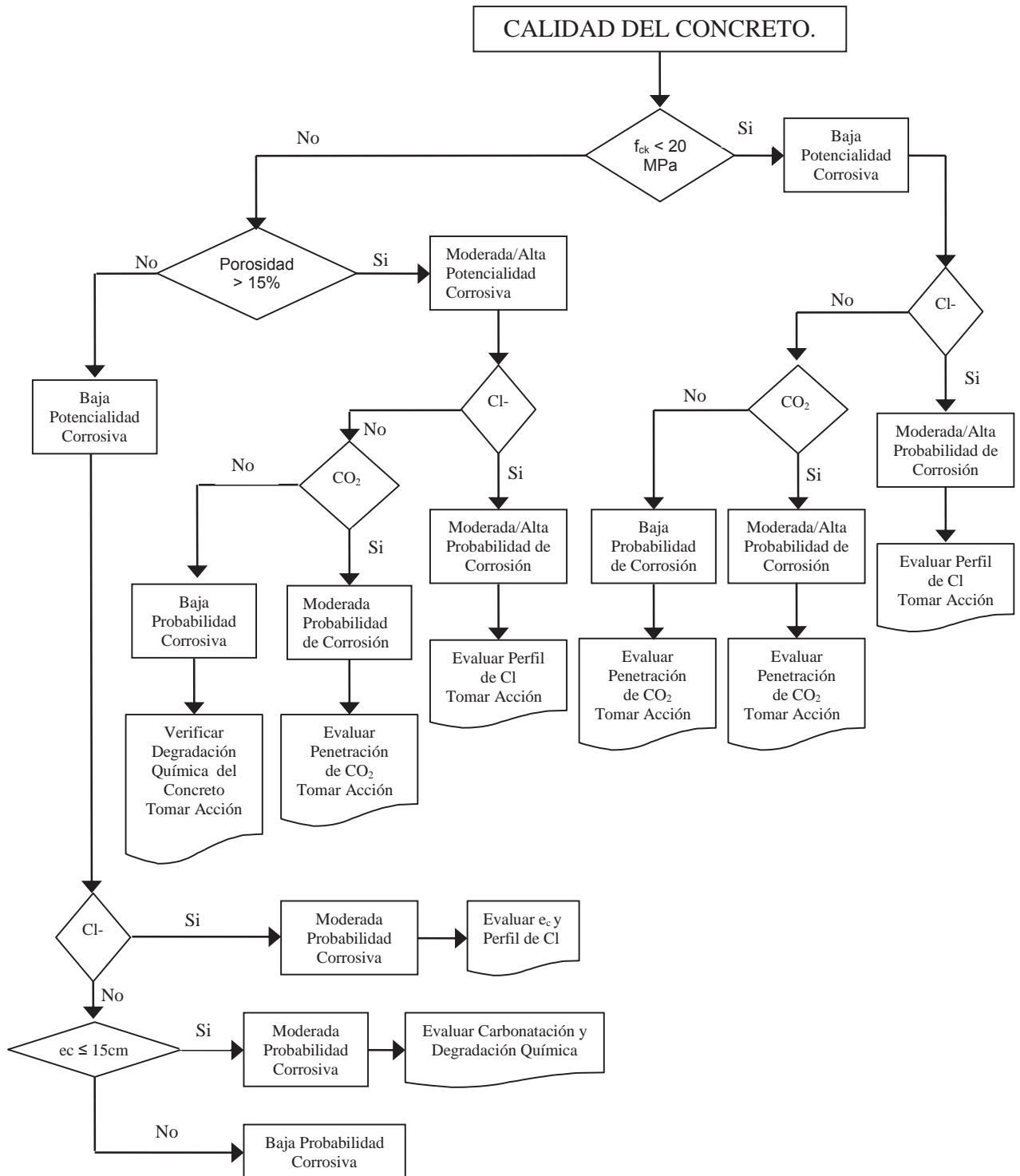


Figura 3.20. Calidad del Concreto: Evaluación y Diagnostico. ⁴



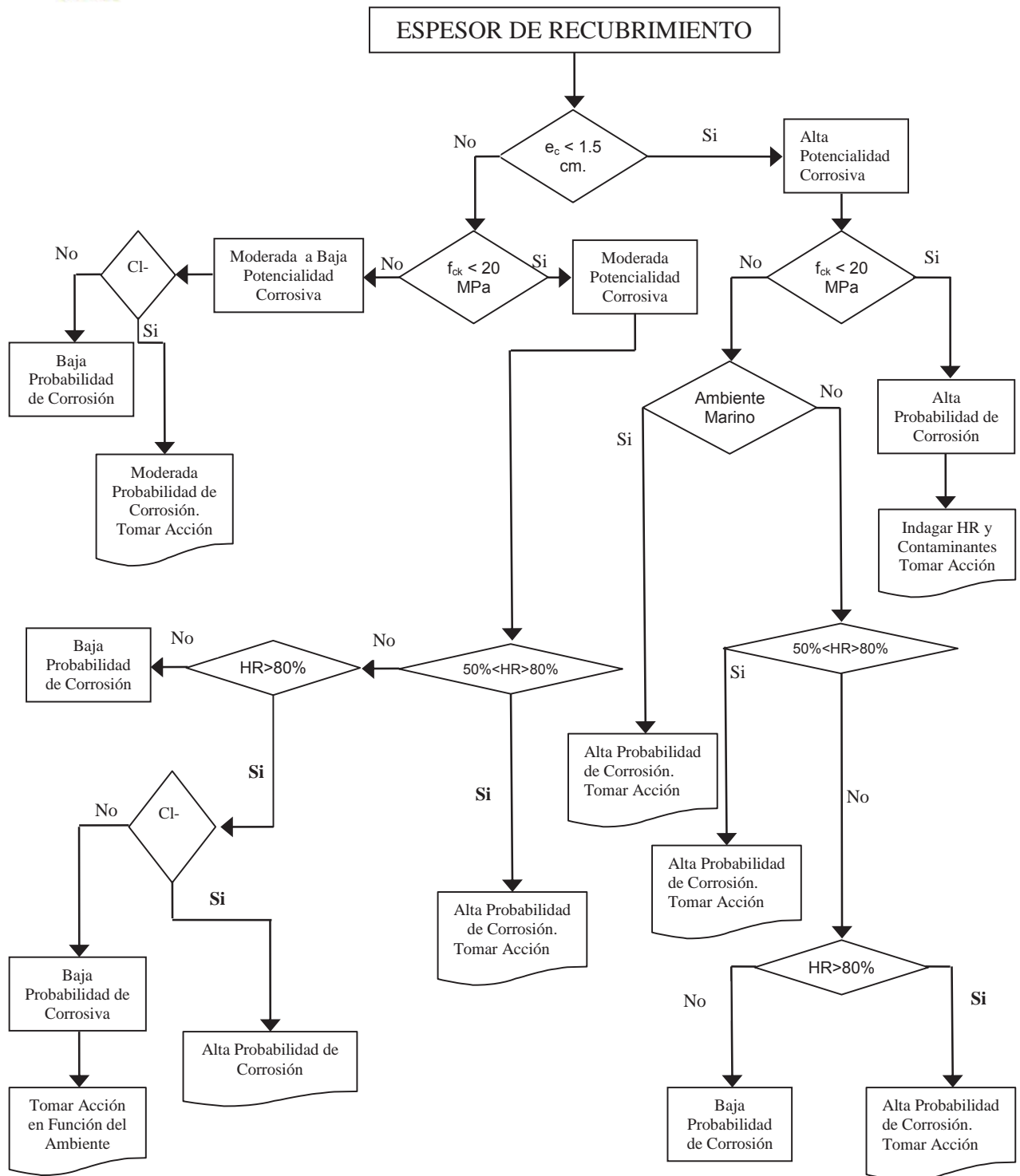


Figura 3.21. Espesor de Recubrimiento del Concreto sobre el Refuerzo: Evaluación y Diagnostico. *El espesor efectivo (e_c / distancia desde el paramento externo del concreto hasta la barra más externa) es de 1.5cm, correspondiente a 2.5cm de espesor nominal.⁴



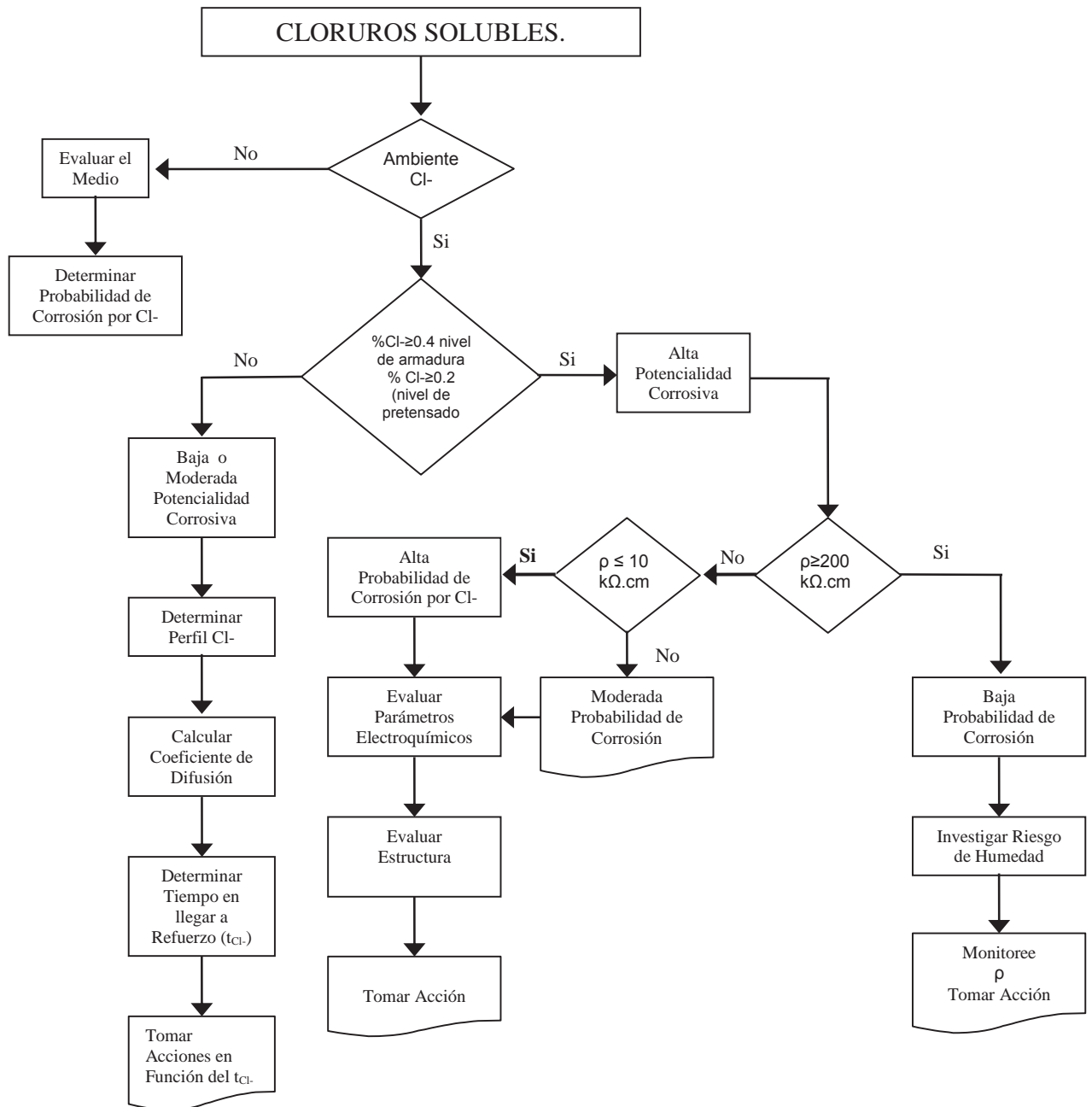


Figura 3.22. Cloruros Solubles (por peso de Cemento): Evaluación y Diagnostico. ⁴



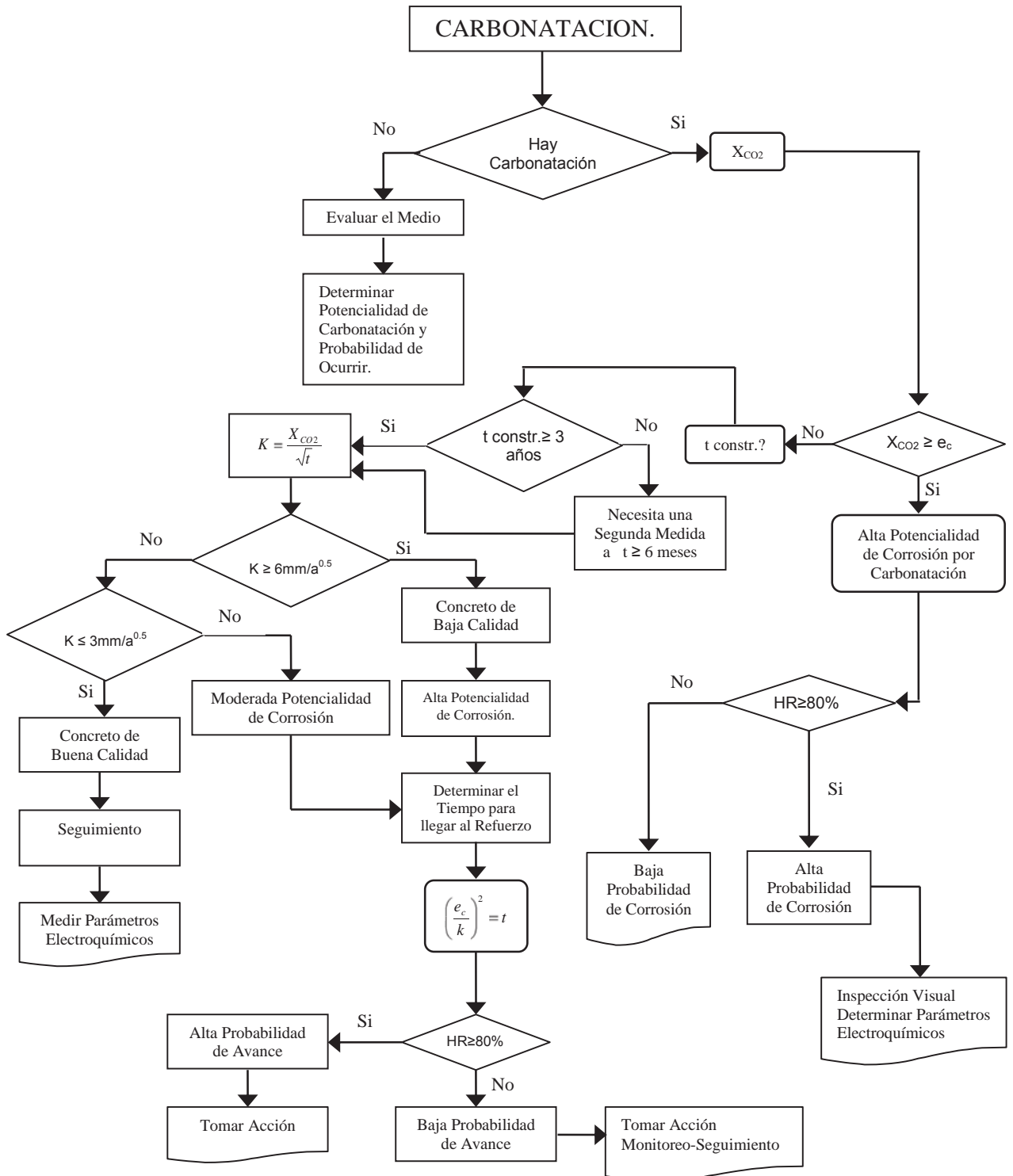


Figura 3.23. Carbonatación: Evaluación y Diagnostico. ⁴





3.3.3. PROCEDIMIENTO GENERAL DE DIAGNOSTICO.

Luego de analizar los resultados de las inspecciones y evaluaciones, se procederá a la identificación y a la enumeración de condiciones, características o evidencias que, individualmente o en conjunto, pueden haber ocasionado - o eventualmente puedan ocasionar - la corrosión del acero de refuerzo. Seguidamente deberá establecerse la magnitud y morfología del daño existente (o del daño potencial), así como la necesidad de un seguimiento en el tiempo y la urgencia de intervención, en una zona específica o en toda la estructura.⁴

La interrelación de evidencias y evaluación de condiciones ambientales del concreto, del acero y de la estructura como un todo puede ser variada y compleja. Cada caso debe ser analizado según los criterios y agravantes del contexto en que se presenta. Se deben considerar incluso los aspectos económicos y sociales que puedan influir en los criterios para definir la criticidad y urgencia de intervención.⁴

La correlación de estos resultados seguirá los criterios indicados, haciendo uso de las tablas de valoración de los ensayos y los diagramas de flujo que se han presentado para cada situación en particular. Se deben establecer los puntos a revisarse nuevamente para clarificar el mecanismo de corrosión actuante y la severidad presentada, así como la potencialidad de otros tipos de corrosión.⁴

Es importante establecer el origen de los agentes agresivos y de los factores contribuyentes. De esta forma se podrá garantizar que la intervención a ejecutar en la obra sea más adecuada para corregir los daños existentes, previniendo su extensión y reparación, tanto como la generación de nuevos daños.⁴





4. REPARACIONES DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.

4.1. ORIENTACION PARA UNA CORRECTA REPARACION Y REHABILITACION.

4.1.1. GENERALIDADES.

Al lado de un gran e indiscutible crecimiento de la necesidad de intervenir las estructuras de concreto con el fin de alcanzar la vida en servicio para la cual ésta fue diseñada, también se ha observado que muchas veces la intervención no es la más acertada. Los materiales o los procedimientos adoptados para la reparación y reconstrucción no siempre confieren a la estructura las características de durabilidad compatibles con la importancia de la obra y con los elevados costos de reparación y reconstrucción de las mismas. También ha sido frecuente y constatado un resultado negativo, o sea, una vida útil muy corta después de esa reparación, la mayoría de las veces mucho mas corta que el periodo transcurrido entre el término de la obra hasta la necesidad de intervención.⁴

A través de una analogía con la Medicina se puede considerar que las estructuras de concreto y las construcciones civiles en general deberían ser estudiadas y entendidas a la luz de nuevos enfoques complementarios a los tradicionales, los cuales no son suficientes para el entendimiento del comportamiento de las construcciones. La Teoría Clásica de las Estructuras, la Resistencia de los Materiales, la Estabilidad de las Estructuras y el curso tradicional de los Materiales y Técnicas de Construcción Civil, no fueron lo suficientemente capaces de explicar adecuadamente el envejecimiento prematuro de las construcciones civiles. En vista de ella, en los últimos 20 años, al menos, nuevas disciplinas fueron colocadas a disposición de los ingenieros civiles conforme a las presentadas en la Figura 4.1.⁴

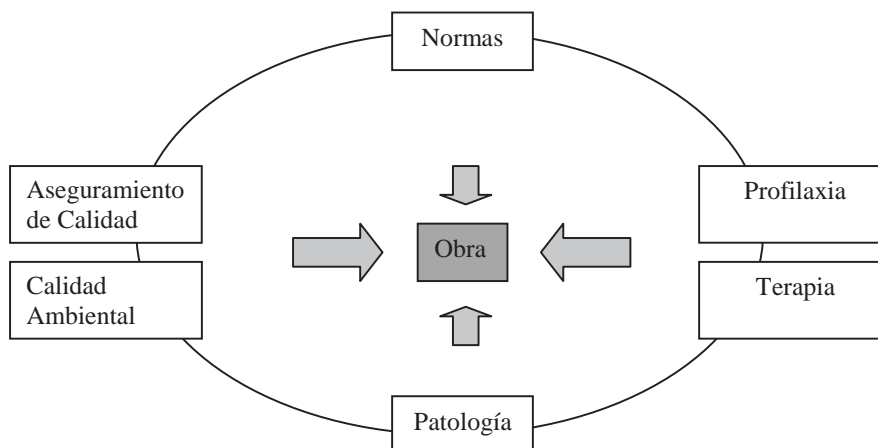


Figura 4.1. Nuevas Disciplinas Introducidas en Ingeniería Civil.⁴





Se entiende por **Normalización**, un gran movimiento internacional de uniformización de criterios básicos de proyectos y construcción, cuyos ejemplos notorios son: CEB-FIB Model 90, CIB W-86, ISO, CEN-ENV 206, MERCOSUR-CLAES, NAFTA-ACI 318.⁴

Se entiende por **Aseguramiento de Calidad o Calidad Ambiental**, todos los procedimientos actuales disponibles y recomendados por las normas de la serie ISO 9000 y de serie ISO 1400.⁴

La **Patología**, puede ser entendida como una parte de la Ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y los orígenes de los defectos de las construcciones civiles, o sea, es la ciencia de que permite un correcto diagnóstico de un problema patológico. En este presente trabajo se dedica a los capítulos anteriores, esencialmente a conocer las herramientas básicas y los procedimientos necesarios para una adecuada inspección, evaluación y diagnóstico de los problemas de corrosión del refuerzo en estructuras de concreto.⁴

Se entiende por **Profilaxia**, todas las medidas preventivas que deben ser tomadas en las construcciones nuevas, a partir del correcto diagnóstico de los problemas. Se aplica especialmente a construcciones nuevas, como una forma de evitar deterioro precoz.⁴

La **Terapia**, como nueva disciplina de la Ingeniería Civil, estudia la corrección y la solución duradera de los problemas patológicos, o sea, como corregir la pérdida precoz y no prevista de la vida útil inicialmente esperada y deseada para estructuras de concreto.⁴

Considerando que estas nuevas disciplinas fueron introducidas en la Ingeniería Civil en los últimos 20 años, se verifica que, entre ellas, la Terapia de las Construcciones es la menos conocida y dominada el día de hoy. Actualmente son pocas las publicaciones técnico-científicas sobre el tema y prácticamente no existe un consenso que permita una Normalización efectiva y fuerte en el área. Un gran número de entidades internacionales han dedicado esfuerzos en esa dirección, principalmente a partir del inicio de esta década, pudiéndose citar: COST-509, COMETTPROJECT7352/Cb, ACICOMMITEE 546, GEHO, RILEM 124-SRC, RILEM 130-CSL, SHRP S-360 y otras, todos muy recientes y en la mayoría de los casos solo existen textos preliminares y en discusión.⁴

Existe poco consenso sobre el tema, lo cual se ha agravado por el gran número de nuevos materiales sistemáticamente lanzados al mercado. El sector de producción industrial para reparación de estructuras de concreto es uno de los más prometedores en la construcción civil y ha generado en los últimos años un elevado número de nuevas alternativas de materiales, sistemas y técnicas de reparación.⁴





Los ingenieros encargados de un proyecto de mantenimiento, reparación y rehabilitación deben permanentemente actualizarse para poder hondar en los problemas y sus correcciones con una visión más amplia, sistemática y holística. Sin embargo, en la práctica existe la costumbre de dejar este entrenamiento por cuenta del maestro de obra, de más experiencia, por lo que ha habido experiencias desastrosas y esto debe ser enérgicamente evitado. Una intervención de una estructura con problemas de corrosión de armaduras es una operación cara, delicada y requiere de un conocimiento consistente del asunto y de sus implicaciones estéticas, estructurales y sociales. Para que el trabajo sea durable, es preciso que sea proyectado en detalles, especificar técnicamente los materiales y los equipos y finalmente, necesita de gran precisión en los procedimientos de preparación del sustrato, limpieza, aplicación de los materiales y sistemas de cubrimiento y protección.⁴

Una metodología general para una solución duradera de los problemas patológicos en estructuras de concreto dañadas por corrosión de las armaduras se presenta en forma muy sistemática en la Figura 4.3.⁴



Figura 4.2. Estructura dañada por el fenómeno de Corrosión.



Evaluación del Estado Actual de la Estructura

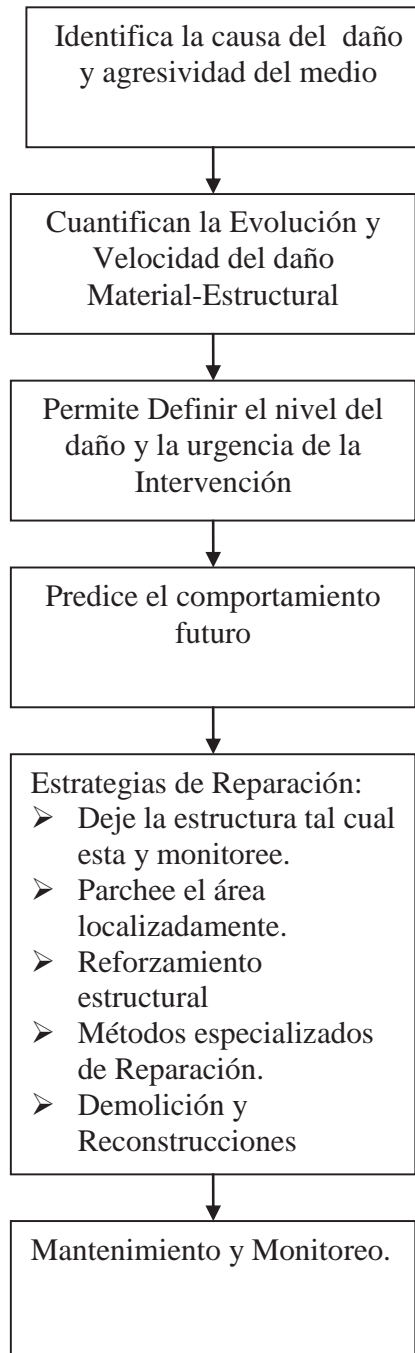
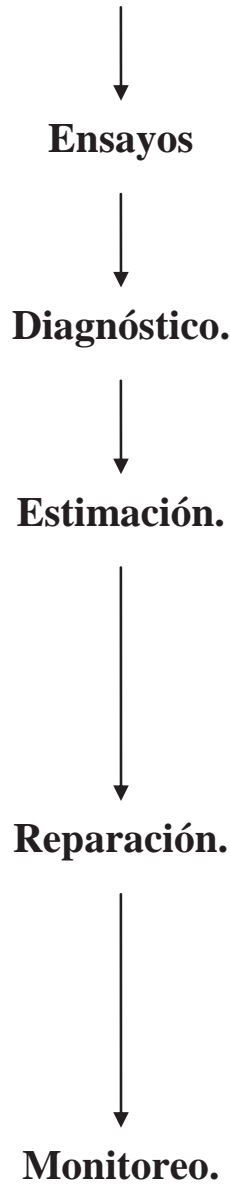


Figura 4.3. Metodología General de Análisis y Solución a los Problemas Patológicos en Estructuras de Concreto. ⁴





4.1.2. PROCEDIMIENTO GENERAL DE REPARACIÓN.

En todos los sistemas y procedimientos de reparación se deben considerar tres aspectos fundamentales:⁴

- Desempeño intrínseco del material o sistemas de reparación.
- Tensiones en la interfase entre la reparación nueva y la estructura antigua.
- Interferencia de un equilibrio físico-químico de la estructura existente, principalmente en las proximidades de la región reparada.

Una reparación localizada siempre puede resultar en una intervención de poca efectividad por los riesgos de interferencia de las celdas de corrosión electroquímica. Cuando el ambiente es agresivo y el concreto es de calidad inferior los resultados pueden ser peores. Además de este riesgo hay otras acciones que actuando sobre la reparación, sobre la interfase o zona de transición y sobre la propia estructura existente, pueden llevar una reparación a un fracaso caracterizado por una corta vida útil después de la intervención.⁴

En general, un proyecto o diseño detallado de la reparación debe siempre ser efectuado, a través de un análisis cuidadoso de todas las informaciones o alternativas disponibles de acuerdo a lo presentado en la Figura 4.4.⁴

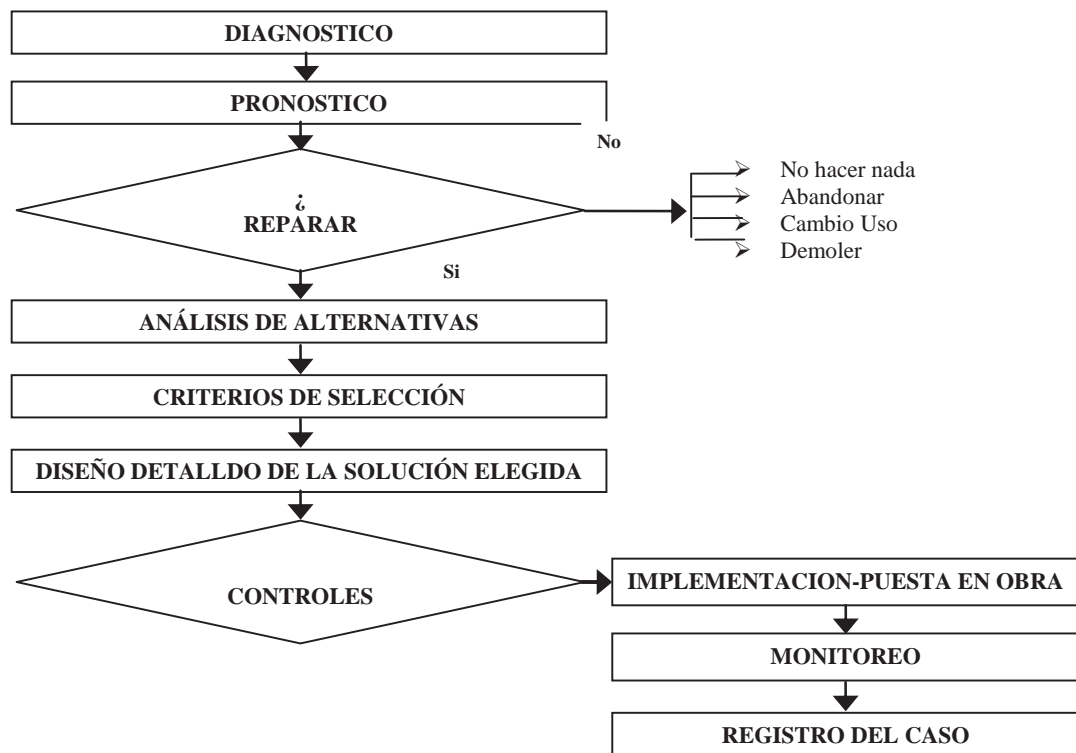


Figura 4.4. Flujograma a seguir para la reparación de estructuras de concreto reforzado.⁴





4.1.3. ALTERNATIVAS DE REPARACIÓN.

Existen varios criterios para seleccionar la mejor alternativa de reparación/rehabilitación adecuada a las características específicas de la estructura evaluada. El diagrama de flujo presentado en la Figura 4.5 presenta aquellas que deben ser consideradas para obtener una mejor solución y en la Figura 4.6 se presenta un diagrama esquemático de alternativas de reparación, cuyos fundamentos básicos fueron discutidos en Capítulos anteriores.⁴

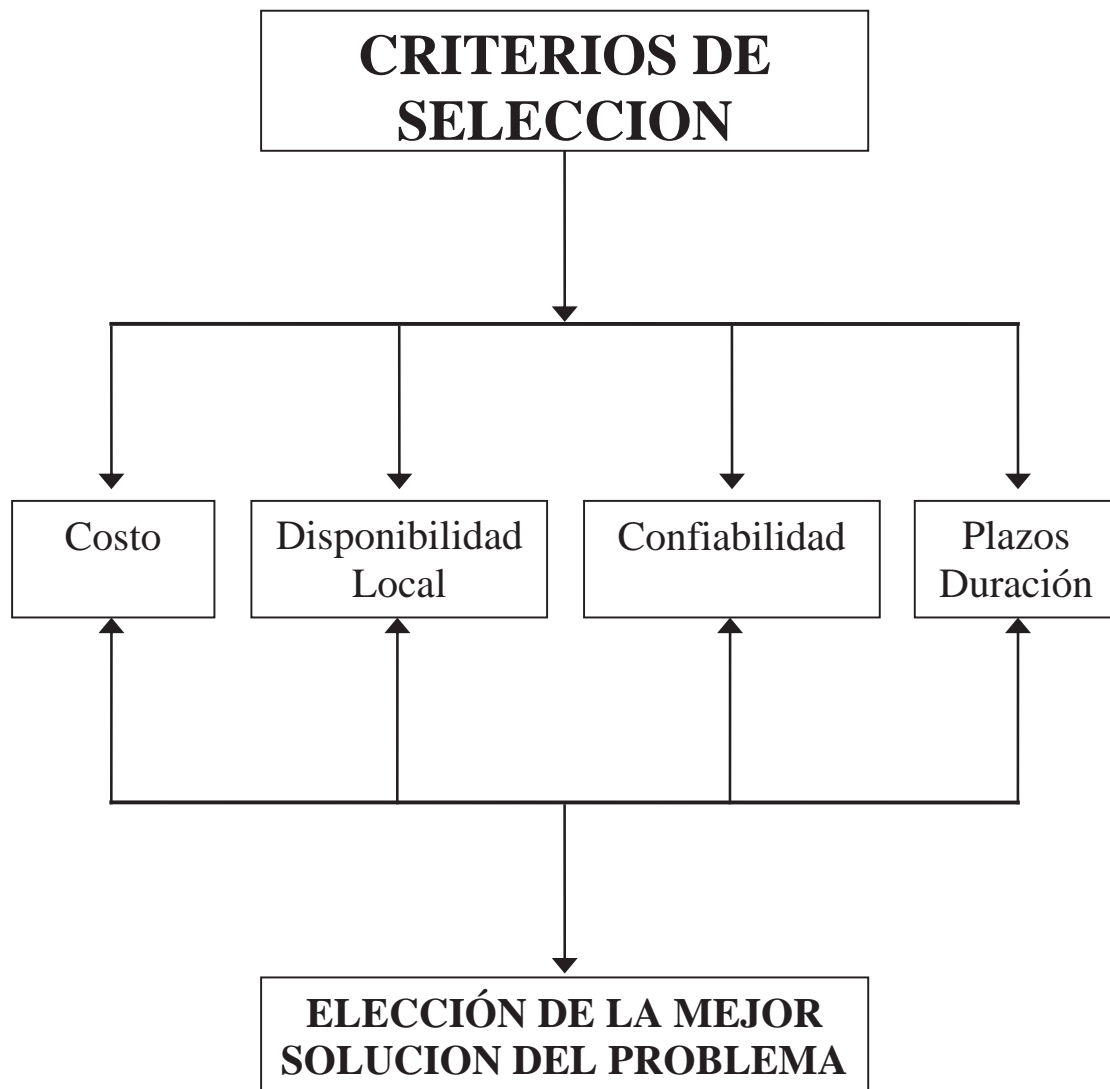


Figura 4.5. Criterios de Selección de la Alternativa más conveniente en una Situación específica.⁴



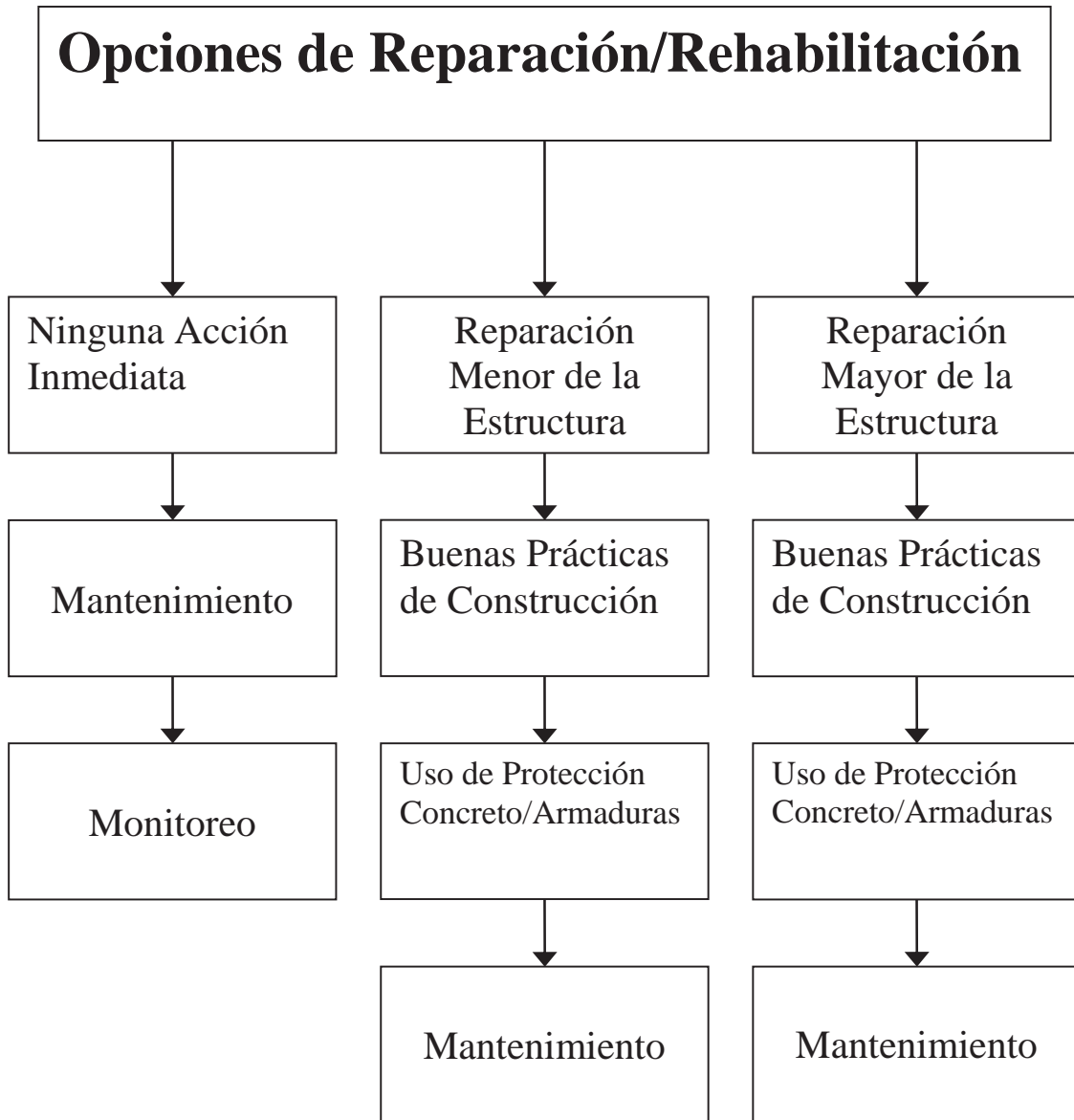


Figura 4.6. Opciones a tomar en cuenta en la reparación/rehabilitación de la Estructura.⁴

En el apartado posterior se analizarán algunos de los métodos de reparación, de los que conocemos como más tradicionales como algunos de los no tradicionales como son la Extracción Electroquímica de Cloruros, la Realcalinización y la Protección Catódica; los cuales se han ido desarrollando en los últimos años y se ha aunado más en ellos por los amplios resultados mostrados en la actualidad en estructuras de concreto reforzado.





4.1.4. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN O REPARACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

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

Para actuar sobre el fenómeno corrosivo podemos adoptar una de las siguientes medidas:⁷

- Demolición de la estructura dañada o sustitución del elemento dañado.
- Control y seguimiento del avance del deterioro hasta llegar a una situación límite, pero sin intervenir en el proceso de corrosión.
- Actuar sobre el proceso de corrosión, que en función del daño producido utilizaremos un método u otro (protección catódica, extracción electroquímica de los cloruros, etc.).⁷

4.1.4.1. Eliminación del Concreto dañado por los Métodos Tradicionales.

Los métodos tradicionales se basan en una reparación del concreto deteriorado, eliminándolo parcial o totalmente, dependiendo del alcance de daño. Esta técnica se conoce como "reparación por parcheo". Con ella se pretende reconstruir las propiedades físicas y estéticas de la estructura de concreto, y también la protección de las armaduras utilizando un material que repase el acero y forme una barrera de protección.⁷

El procedimiento a seguir para reparar el concreto dañado es:⁷

- Preparación previa de la estructura: apuntalamiento provisional si la capacidad resistente no es la suficiente.
- Eliminación del concreto dañado hasta unos 2.5cm por detrás de la armadura, para poder limpiarlas fácilmente.
- Limpieza del óxido que recubre las armaduras con un chorreado de arena o cepillado. Solo se realiza si la corrosión es debida a los cloruros.
- Colocación del material de reparación. Se suele colocar algún tipo de resina asegurando la perfecta adherencia.⁷

Si se produce una pérdida de sección de las armaduras de alrededor de 15-25%, estas se sustituyen por otras en buen estado.⁷





4.1.4.2. Métodos de reparación del Concreto dañado no Tradicionales.

4.1.4.2.1. Protección Catódica (PC).

La protección catódica se basa en llevar las armaduras embebidas en el concreto a un potencial de valor tal que la corrosión no pueda tener lugar. Se trata de situar el acero por debajo del potencial de picadura, es decir, en la zona de inmunidad de los diagramas de Pourbaix. Ello se consigue reduciendo el contenido de oxígeno, o haciendo actuar a toda como cátodo. Este último supuesto se puede llevar a cabo mediante dos métodos:⁷

1) Conectando la armadura a los llamados "ánodos de Sacrificio", (Figura 4.7), que son materiales que poseen mayor tendencia a corroerse que el acero del concreto, como magnesio, cinc o aluminio, o aleaciones basadas en estos metales. En estructuras de concreto, estos ánodos deben ser compatibles con el material cementicio para evitar el deterioro de aquellos debido a reacciones de autocorrosión. Su principal desventaja radica en el hecho de al presentar el concreto una resistencia eléctrica más elevada su eficiencia no siempre esta garantizada. Los más utilizados son:^{7,8}

1. Capas termodepositadas por Spray de Zn y Al así como de aleaciones de Al.⁸
2. Ánodos de Sacrificio colocados en orificios practicados a lo largo de la estructura que posteriormente se cubren con material cementante.⁸



Fotografía 4.1.a. Zinc Proyectado.⁸



Fotografía 4.1.b. Placas Adheridas.⁸

2) Por el método de "corriente Impresa" (Figura 4.8), en el cual la protección se lleva a cabo por medio de una fuente externa de corriente continua. El Terminal positivo de la fuente debe conectarse a un anodo auxiliar, mientras que el negativo se conecta a la armadura a proteger (CEN 2000 12696-1).⁷



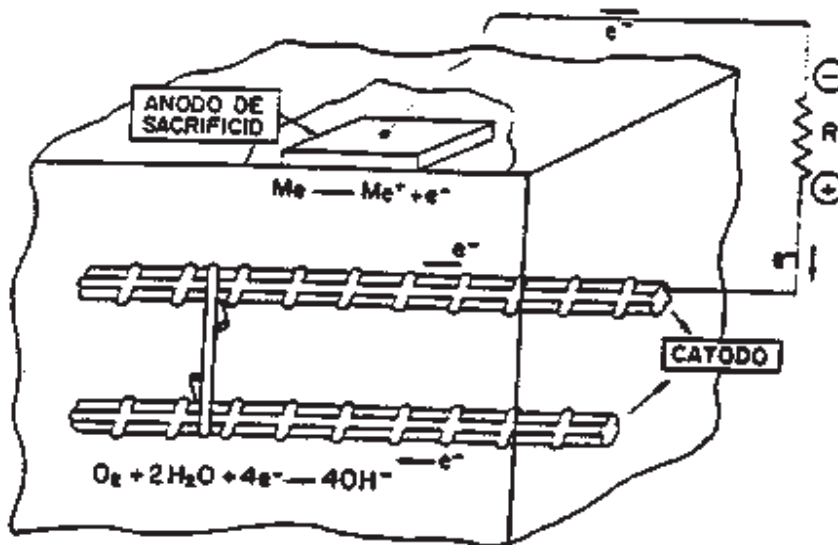


Figura 4.7. Protección Catódica mediante "Ánodos de Sacrificio".

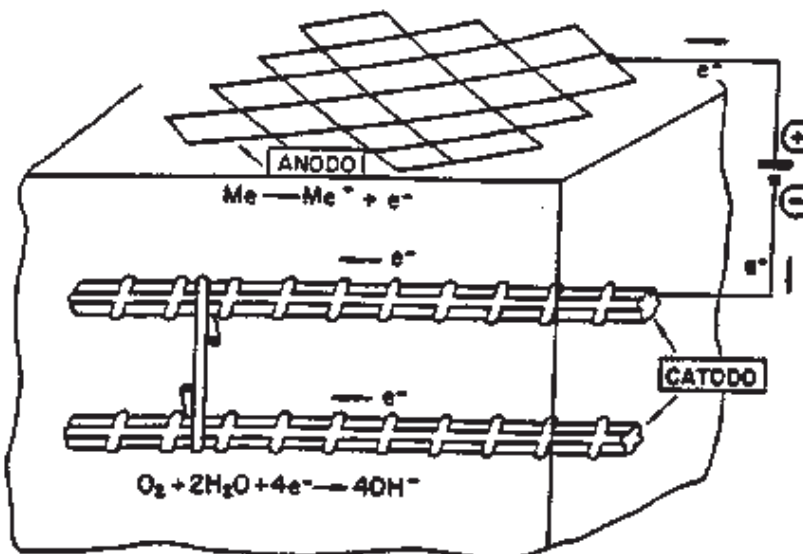


Figura 4.8. Protección Catódica "Corriente Impresa".⁷

Una de las ventajas de este método es que no es necesario eliminar el concreto contaminado, aunque sí es recomendable reconstruir las zonas dañadas para asegurar una buena distribución de la corriente. Sin embargo, también presenta una serie de inconvenientes como:⁷

- Elevados costos económicos de ejecución y mantenimiento.
- No se conocen bien los efectos a largo plazo sobre la adherencia.
- No se conoce con exactitud como y cuando instalar la protección catódica.⁷





4.1.4.2.2. Realcalinización.

En el caso de este método, el objetivo del tratamiento consiste en **la restauración de la alcalinidad** del concreto alrededor de las armaduras (como consecuencia de la electrolisis del agua en el cátodo), de forma que éstas se repasivan, y el establecimiento de un flujo **electrosmóístico** que introduce a los iones carbonato desde la solución externa hacia la armadura.⁸

Esta técnica puede ser aplicada utilizando dos métodos diferentes: con y sin corriente eléctrica.⁷

La realcalinización sin corriente eléctrica se basa en el hecho de la elevada movilidad de los iones OH⁻ que son capaces de difundir desde zonas de elevado pH a otras de menor pH. Este cemento al ser muy alcalino puede realcalinizar el interior del concreto en una profundidad de 1 a 2 cm. Por ello, es fundamental mantener húmeda la capa de recrecido, favoreciendo así la difusión de los OH⁻ desde el exterior hacia el interior.⁷

La realcalinización con corriente eléctrica es un método que actúa con más rapidez. Consiste en aplicar una corriente eléctrica que produzca OH⁻ en las armaduras por electrolisis. El dispositivo es similar al de la protección catódica.⁷

Pero la eficiencia de este método es muy discutida tanto por los costos económicos, como por el alcance y duración de los efectos, ya que el pH que se alcanza llega hasta 9 o 10, pero no restaura ni la reserva alcalina ni los pH habituales en el concreto. Este método es utilizado para colocar una barrera anticarbonatación en las superficies del concreto tratado.⁷

4.1.4.2.3. Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC).

4.1.4.2.3.1. Antecedentes más Notorios sobre el Fundamento y Aplicación del Método.

Las primeras pruebas de EEC fueron realizadas en EEUU desde 1973 a 1975. Mediante ensayos de laboratorio, empleando altos voltajes, se llegó a la conclusión de que el método obtenía resultados satisfactorios en lo que respecta a la extracción de cloruros, pero también presentaba gran número de inconvenientes. La eficiencia conseguida fue muy baja, de modo que solo el 6% de la carga que circulaba a través del concreto era transportada por cloruro; se produjeron redistribuciones de cloruros importantes después del tratamiento; la temperatura del concreto se elevó desde 24°C a 52°C en 24 horas. Además se pudo apreciar un aumento considerable de la porosidad.⁷

Después de estos estudios, la investigación de este método no se siguió durante un tiempo, debido a varios factores, tales como la seguridad y el alto voltaje requerido, la baja eficiencia obtenida y los daños potenciales sobre la estructura, como la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, las grietas producidas por la presión del gas H₂ gaseoso y las altas temperaturas alcanzadas en el concreto.⁷





En Europa, se obtuvo una patente llamada "Extracción de Cloruros del Concreto". El material usado es pasta de papel como material para retener el electrolito exterior. Se aplica mediante proyección por pistola, lo que permite su fijación sobre superficies verticales. El ánodo queda embebido en la pasta, los voltajes empleados son de aproximadamente 30V, bastante menores a los empleados en los estudios anteriores, pero la duración del tratamiento también fue superior.⁷

En EEUU el método fue estudiado con mayor detalle entre 1998 y 1993 dentro del "Strategic Highway Research Program" (SHRP). SHRP recomienda el uso de una malla de titanio disponible comercialmente como ánodo, el empleo de un electrolito alcalino para prevenir tanto la formación del gas cloro como el deterioro de la superficie del concreto y densidades de corriente de entre 1 y 5 A/m². De este modo el 10% y el 30% de la corriente se empleaba en transportar Cloro. Después de una carga de $2 * 10^6$ C/m² - $5 * 10^6$ C/m², la extracción de cloruro se hace ineficiente; lo cual sucedía de 10 a 50 días de aplicación. Con este procedimiento pudo extraerse entre el 20 y el 50% del cloro inicial. Los estudios realizados a partir de estos datos recomendaron el empleo de este método cuando la corrosión está en sus primeras etapas y el concreto no ha sufrido un deterioro importante. En tales casos la vida de la estructura puede prolongarse de 5 a 10 años.⁷

El primer estudio europeo bien documentado de la aplicación en campo del procedimiento fue realizado por la Swiss Federal Highway Agency en 1990. Los resultados mostraron que más del 50% del cloruro pudo ser extraído en 8 semanas, comprobando que el procedimiento podía emplearse en estructuras muy contaminadas, si bien en los casos de contaminación muy heterogénea, podía ser necesario más de un tratamiento.⁷

Una interesante variación fue aportada por Rose en 1994 que consiste en emplear, en lugar de malla de titanio, una lamina de papel de aluminio como ánodo exterior. El mecanismo de este método es la autorregulación ya que el papel de aluminio actúa como un ánodo de sacrificio y se disuelve a una velocidad proporcional a la densidad de la corriente. En las zonas donde, debido a algún tipo de defecto local, la resistividad del concreto es muy pequeña, pasa una gran cantidad de corriente, disolviéndose el aluminio e impidiendo el paso posterior de corriente, funcionando como regulador de corriente en el caso de concretos muy heterogéneos.⁷

Dentro del programa europeo COST 509 de Corrosión y Protección de Metales en contacto con Concreto, que comenzó en 1992 y fue completado en 1996, la EEC fue estudiada por las instituciones investigadoras que cooperaban en Australia, Noruega, Inglaterra y Holanda. Los grupos habían preparado un documento enfocado en aplicaciones prácticas que fue publicada en 1997.⁷





4.1.4.2.3.2. Fundamentos.

La Figura 4.8 muestra el esquema de funcionamiento de la EEC. El método consiste en aplicar una corriente eléctrica continua entre la armadura que actúa como cátodo y un ánodo exterior que se coloca de forma temporal sobre la superficie del concreto. El electrodo externo es preferentemente una malla de titanio, y debe estar en contacto con un electrolito, que se coloca sobre la superficie del concreto, para asegurar la conducción al refuerzo.⁷

Los iones con carga negativa, como los iones cloruro, migran en el campo formado por la corriente eléctrica desde la armadura a la superficie, donde está situado el ánodo exterior.⁷

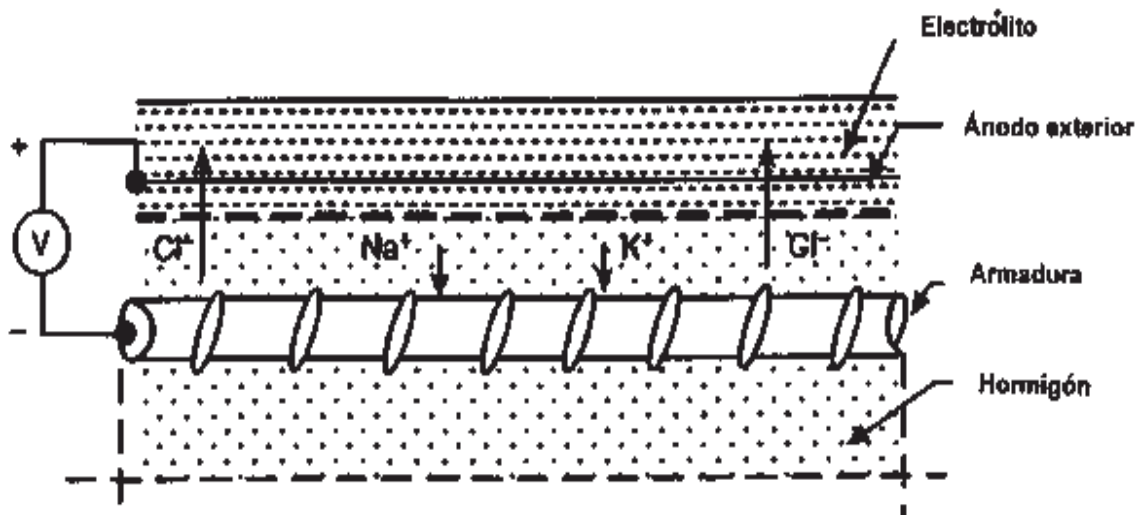


Figura 4.9. Esquema del Funcionamiento de la extracción Electroquímica de Cloruros.⁷

4.1.4.2.3.3. Factores que pueden Condicionar la Técnica de EEC.

a. El Campo Eléctrico.

Debido a que el ion cloruro es transportado a lo largo del campo eléctrico, su distribución junto al refuerzo y la colocación del ánodo en la superficie del concreto es importante. La Figura muestra la distribución de las líneas de corriente entre un conductor lineal y una superficie exterior. Como se puede apreciar, en la vertical de la barra las líneas de corriente son más cortas, eso significa que la fuerza que actúa sobre los iones es mayor y también, por lo tanto, su velocidad de extracción. Por detrás de la barra, la cantidad de cloruro que se puede extraer es significativamente menor.⁷



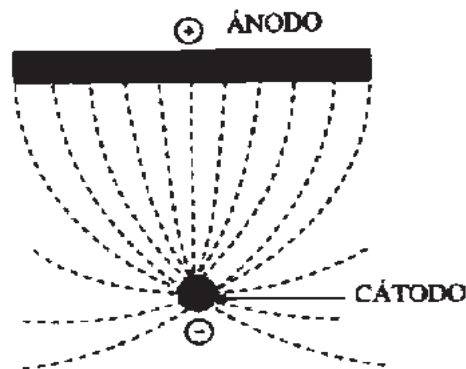


Figura 4.10. Distribución de las líneas del Campo Eléctrico.

b. Espesor del Recubrimiento

De las interacciones antes explicadas es bastante obvio que las diferencias en el grosor de las coberturas juega un papel importante. Dentro del área a ser reparada las densidades de corriente mas altas serán las de las zonas donde la cobertura es mas delgada (la resistencia eléctrica entre el refuerzo y el ánodo es la mas baja). Esto significa que la eficiencia de la EEC en concreto con coberturas de grosor variable será mas baja en las zonas donde la cobertura sea gruesa y relativamente alta en áreas donde sea delgada.⁷

Es importante, prestar atención especial en áreas de baja resistencia, por ejemplo donde hay peligro de que el electrolito externo toque directamente la superficie del acero. Por lo tanto, grietas y otros defectos deberían estar sellados antes de comenzar el tratamiento de EEC.⁷

c. Transporte Iónico en Soluciones Acuosas.

Las soluciones acuosas de sales, bases, ácidos, etc. son conductoras. Estas sustancias se presentan en la disolución en forma disociada, están separadas en partículas cargadas (iones). Cuando se aplica un voltaje, las partículas comienzan a moverse a través del campo eléctrico formado junto a los electrodos. Este tipo de movimiento se llama migración. Además de la migración debemos considerar los movimientos de los iones por difusión y convección (movimiento de iones por influencias mecánicas, por movimientos, o por gradientes de temperaturas).⁷

La corriente eléctrica que circula a través de la disolución a un voltaje y temperatura dados, es proporcional al número de iones presentes en la disolución y además depende de la velocidad a la que estos iones son capaces de moverse hacia los electrodos. La temperatura también tiene una fuerte influencia en la conductividad del electrolito de forma que aumenta con la misma, mientras que decrece en el caso de conductores metálicos.⁷





La conductividad total del electrolito es la suma total de las conductividades parciales de cada ion. La contribución de cada ion al total de la corriente se llama número de transporte. El nº de transporte depende de la concentración y es un importante parámetro electroquímico, que representa el cociente entre la corriente transportada por el cloruro y la total.⁷

$$t_{Cl^-} = \frac{Q_{Cl^-}}{Q_{total}}$$

El nº de transporte es independiente de la densidad de corriente aplicada. Esto significa que la extracción de una cierta cantidad de cloruros requiere más tiempo a bajas densidades de corriente que a elevadas densidades, mientras que la carga necesaria a pasar a través del electrolito es la misma.⁷

De la ecuación anterior se deduce que el nº de transporte llegará a ser tanto más grande cuanto mayor es la concentración de los iones cloruro contaminando la disolución y menor es la concentración de otros iones con carga negativa. La disolución de los poros del concreto contaminado con cloruros contiene fundamentalmente iones Cl^- y OH^- . La concentración de otros aniones, como SO_4^{2-} , es normalmente tan pequeña, comparada con el Cl^- y OH^- , que puede despreciarse.⁷

El nº de transporte del Cl^- y por lo tanto, la cantidad de cloruro que puede eliminarse por EEC, será tanto mayor cuanto menor es el nº de OH^- presentes en la solución de los poros.⁷

d. Transporte de Iones en el Concreto.

Las interacciones que aplicamos a soluciones acuosas son, básicamente, también válidas para el concreto, ya que el transporte de corriente eléctrica se produce caso exclusivamente por migración de iones disueltos en los poros capilares del concreto. A diferencia de lo que ocurre con soluciones no confinadas, los iones no pueden moverse al polo opuesto por el camino más corto. Ellos tienen que recorrer un estrecho camino con pequeños poros capilares y rodeados de partículas del bloque. Por esto, la actual distancia de recubrimiento, por ejemplo desde el refuerzo a la superficie del concreto, es más larga que el espesor de recubrimiento. Además los iones solo pueden ser transportados por poros abiertos, no por cerrados. También, la velocidad de migración de los iones en el concreto depende tanto del volumen del poro como de la distribución y geometría de los mismos. Como los poros del concreto proceden de la matriz del cemento, la posterior distribución de los mismos depende de la relación a/c, la compactación y curado del concreto, etc., y la velocidad del transporte del Cl^- hacia fuera, varía de un caso a otro. Por esta razón, el movimiento de los iones causado por difusión y convección es más lento en el concreto que en soluciones no confinadas. Comparado con el movimiento causado por migración, la contribución de la difusión y convección puede ser despreciable cuando se aplican densidades de corriente elevadas para la EEC.⁷





La velocidad a la que el cloruro se extrae se directamente proporcional a la cantidad de corriente que pasa por el concreto. Para un voltaje dado la corriente es mayor cuando menor es la resistencia eléctrica del concreto, de este modo, cuanto mas húmedo esta el concreto, mas eficaz resulta el tratamiento. La parte de la corriente que es transportada por los iones cloruro es proporcional a su concentración.⁷

4.1.4.2.3.4. Comportamiento a largo plazo.

Como es sabido cuando los cloruros son extraídos a través de la superficie, mediante la EEC, estos no son extraídos completamente. Existe el riesgo de que los cloruros que permanecen en el concreto puedan retroceder, por difusión, hacia la armadura y estimular un proceso de corrosión posterior. Cuántos cloruros se difunden, en qué tiempo y desde que distancia depende, naturalmente, de un número de parámetros, como son: el volumen y diámetro de los poros capilares del concreto, el secado de los poros y el grado de fijación de los cloruros por parte del concreto. La difusión ocurre más lentamente cuanto más tortuosa y seca esta la red de poros. En condiciones idénticas de almacenamiento, cuanto mas poroso sea el concreto (mayor a/c) se seca mas rápidamente que un concreto de baja porosidad (baja a/c), de forma que los cambios en la velocidad de difusión no son afectados de la misma manera en concretos diferentes. Por tanto, no es posible predecir, basándose en la formulación de un concreto, cuan rápidamente van a ser transportados los iones disueltos en un concreto seco.⁷

Debido a la dificultad de extraer cloruros por detrás del refuerzo, existe el riesgo de que el cloruro existente en esas zonas se mueva por difusión después del tratamiento y alcance la armadura, produciéndose concentraciones de cloruros alrededor de las barras superiores a los límites permitidos.⁷

4.1.4.2.4. Finalización del Tratamiento: Criterios de Aceptación.

a. Extracción Electroquímica de Cloruros.

En el caso de EEC, no existen normas que fijen los criterios de aceptación. Por tanto, los mismos serán determinados por el propietario de la estructura conjuntamente con el responsable de la aplicación del tratamiento.⁸

En principio, el proceso de EEC terminaría cuando los cloruros residuales, analizados sobre testigos tomados a intervalos regulares, estén dentro de límites aceptables, que según las normas vigentes en la actualidad deberían ser inferiores al 0.4%, en peso de cemento.⁸

b. Realcalinización.

En cuanto a la RAE, el borrador de la CEN publicado en el 2000 señala como criterio de aceptación y finalización del tratamiento el paso de una carga total de 200 A h/m².⁸





Sin embargo, varios autores señalan que esa cantidad de carga pasada puede ser insuficiente para según qué concretos, con lo que este criterio sin más no sería aplicable.⁸

El criterio más comúnmente utilizado es el de la toma de testigos y determinación del frente de carbonatación residual, mediante spray de fenolftaleína (cambio de color a pH 9).⁸

c. Para EEC y RAE.

Otro criterio de aceptación que se puede adoptar, tanto para la EEC como para la RAE, es el de asegurar la repasivación de las armaduras mediante la realización de mapas de potencial o medida de la velocidad de corrosión in situ mediante la técnica de resistencia de polarización.⁸

4.1.4.2.5. Durabilidad.

La durabilidad de un tratamiento de extracción de cloruros y RA depende del porcentaje remanente de cloruros que quedaron en la estructura después del tratamiento, así como el pH final alcanzado en la fase acuosa de los poros del concreto.⁸

Si el contenido de cloruros quedo por debajo del nivel crítico, incluso después de re-distribución de los cloruros remanentes, y se aplican posteriormente tratamientos que impidan o retarden la nueva penetración de cloruros (tratamientos hidrofobitos, por ejemplo), la durabilidad de este tipo de método se estima superior a 10 años (dado que estos métodos son bastante nuevos, no existen casos documentados y seguidos posteriormente de aplicaciones superiores a este periodo de tiempo).⁸

4.1.4.2.6. Efectos Secundarios.

Degradación del concreto por Ataque Acido.

En la reacción anódica se produce acidificación del electrolito. Este ácido reacciona con las especies alcalinas de la superficie del concreto. En CP, dadas las bajas densidades de corriente empleadas, este problema es normalmente despreciable.⁸

Perdida de Adherencia Concreto/Armadura.

A potenciales muy negativos, como en el caso de Extracción de Cloruros y Realcalinización, tiene lugar desprendimiento de H₂, con la posible consecuencia de pérdida de adherencia entre la armadura y el concreto. Se estudio la pérdida de adherencia en función de la densidad de carga pasada, entre 600 y 5000 Ah/m² de acero, encontrando una reducción significativa de la adherencia, aunque con resultados contradictorios a elevadas densidades de carga pasadas.⁸





Cambios Microestructurales en la Matriz del Concreto.

El paso de corriente a través del concreto implica el movimiento de las especies iónicas contenidas en la fase acuosa de los poros, con la consiguiente perturbación de los equilibrios sólido-líquido de la matriz.⁸

Por ello, este tipo de tratamientos (fundamentalmente EC y RA) inducen un incremento en la porosidad total del concreto, así como de un cambio en la distribución de tamaño de poros.⁸

4.1.4.2.7. Costos.

Como guía orientativa, recalcando que esta información debe ser tomada como una simple indicación, se recogen los siguientes costos:

- Protección Catódica por pintura Conductora: 100 euros por metro cuadrado.
- Protección Catódica con malla de Titanio y recubrimiento de base de cemento, entre 200 y 300 euros por metro cuadrado.
- Extracción de Cloruros sobre 150 euros por metro cuadrado.
- Realcalinización alrededor de 100 euros por metro cuadrado.
- La reparación convencional se puede considerar enmarcada en el rango entre 50 y 500 euros por metro cuadrado.

4.1.4.2.8. Características de los Métodos de Reparación No Tradicionales o Técnicas Electroquímicas.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE REPARACIÓN NO TRADICIONALES			
Técnica	Protección Catódica	Extracción de Cloruros	Realcalinización
Detiene la Corrosión por:	Polarización de las armaduras hasta el Potencial de Inmunidad	Eliminación de los Agresivos	Restauración de la Alcalinidad Perdida en el entorno de la Armadura
Duración del Tratamiento.	Permanente.	Temporal. 4 a 10 semanas	Temporal. 1 a 2 semanas
Densidad de Corriente.	10 m A/m ²	0.8 a 2 A/m ²	0.8 a 2 A/m ²





4.1.4.2.9. Ventajas y Desventajas de los Métodos de Reparación No Tradicionales.

Método.	Ventajas.	Desventajas.	Particularidades.
Protección Catódica. (corriente impresa)	<ul style="list-style-type: none">- Puede usarse en la mayoría de las estructuras.- Existe variedad de sistemas disponibles.- Recomendable para protección generalizado del concreto.	<ul style="list-style-type: none">- Requiere de una fuente de corriente permanente.- Instalación permanente.- Control y Supervisión Permanente.- Puede suponer peso adicional para la estructura.	<ul style="list-style-type: none">- Es el único método que puede prevenir y parar la corrosión en el acero de refuerzo.- Es el más usado.
Protección Catódica. (ánodo de sacrificio)	<ul style="list-style-type: none">- No requiere de una fuente de alimentación de corriente permanente.- Mínima supervisión.	<ul style="list-style-type: none">- Instalación permanente.- Permanente pero mínima supervisión.- Puede suponer peso adicional para la estructura.	<ul style="list-style-type: none">- Mantiene su propio control.
Extracción de Cloruros.	<ul style="list-style-type: none">- Instalación Temporal.- No necesita supervisión permanente.	<ul style="list-style-type: none">- No es recomendable en zonas de marea.- Otros tratamientos pueden ser necesarios si una cantidad significativa de cloruro permanece detrás del refuerzo.- No necesita revestimientos de Protección.	<ul style="list-style-type: none">- Es aplicable a estructuras contaminadas por Cloruros, independientemente que estén carbonatados o no.
Realcalinización.	<ul style="list-style-type: none">- Instalación Temporal.- No necesita supervisión permanente.	<ul style="list-style-type: none">- Solo es aplicable en estructuras Carbonatadas.- Necesita revestimientos de Protección.- No es recomendable para grandes zonas.	<ul style="list-style-type: none">- Se recomienda para estructuras carbonatadas con ausencia de cloruros.





5. CONCLUSIONES.

El Concreto Reforzado con acero es un material ampliamente utilizado en la Industria de la Construcción por las indiscutibles ventajas que presenta, sin embargo es muy vulnerable por su constitución a la penetración de agentes externos los cuales dan paso seguido al desarrollo de un fenómeno de suma importancia que es la Corrosión del Refuerzo embebido en el Concreto, siendo este fenómeno la causa principal de deterioro de estas estructuras.

La influencia del medio ambiente en el deterioro del concreto y por consiguiente en el proceso de Corrosión de Estructuras de Concreto es fundamental, siendo característica para los diferentes medios. Es por esta razón que el concreto deber ser diseñado con los requerimientos específicos de servicio para cada estructura de acuerdo al sitio en que esta va a ser construida.

Este deterioro causado por la Corrosión es de gran magnitud debido a su impacto económico, por lo cual es de suma importancia tener el conocimiento de todos los factores que puedan causar su origen y desarrollo, esto para tratar de evitar o controlar este fenómeno a fin de prolongar la vida útil de las obras civiles.

En base a lo investigado en este trabajo se puede caer en la conclusión de que nunca vamos a estar exentos en la totalidad de este fenómeno, pero tenemos varias herramientas que nos pueden asegurar disminuir considerablemente el proceso de la corrosión como utilizar de forma adecuada la combinación de diversas medidas, tanto relativas a la ejecución, como a las características de los materiales, a buen proceso de elaboración del concreto; o el empleo de diferentes medidas de protección

La búsqueda de una metodología precisa que conduzca a una respuesta acertada sobre las causas de la corrosión es un objetivo de la investigación en la materia. Es de suma importancia en el caso de que una estructura de concreto Reforzado este dañada por Corrosión, una correcta Evaluación y diagnósticos confiables que permitan tomar medidas adecuadas, existiendo el riesgo de que intervenciones incorrectas reduzcan la durabilidad que tiene la estructura primitiva. Consideraciones de orden técnico y económico determinan las medidas a tomar para una posible protección, mantenimiento, reparación o rehabilitación de estructuras de concreto reforzado.

RECOMENDACIÓN.

La corrosión de Estructuras de Concreto Reforzado es pues un problema que preocupa notoriamente al sector de la construcción, si bien en los últimos años se han venido desarrollando varios procedimientos para contrarrestar este fenómeno, caemos en la cuenta de que aun queda mucho camino por recorrer, por lo que debemos aunar en el tema de investigación formados por grupos multidisciplinarios de científicos especializados en el tema para continuar con el desarrollo de Procesos, Métodos y Productos que nos permitan reducir los problemas de Corrosión.





6. BIBLIOGRAFIA.

- 1 ORTE CRESPO, Jesús.
“Sistemas de Protección Mediante el Uso de Inhibidores de Corrosión Migratorios”.
Zuncho, nº 11 (Marzo 2007).

<http://webs.demasiado.com/forjados/patología/corrosión.htm>

- 2 RAMÍREZ CRUZ, Elmer (1994).
Tesis Doctoral “Corrosión de las Armaduras Embebidas en Concreto en Ambientes de Extrema Agresividad: Posibilidades de Protección Mediante Inhibidores”.
Director: Gonzáles Fernández, José Antonio
Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas.

<http://webs.demasiado.com/forjados/patología/corrosión.htm>

- 3 **Fundamentos de Corrosión.**
Corrosión – Wikipedia, la Enciclopedia Libre.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

- 4 DURAR. (RED TEMATICA XV. B DURABILIDAD DE LA ARMADURA)
“Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosion de Estructuras de Hormigón Armado”.

CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el
Desarrollo.

2ª. Edición / Julio de 1998.

- 5 **Tipos de Corrosión.**
Tipos de Corrosión | Textos Científicos.

<http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>





6 Manual de Evaluación de Estructuras Afectadas por Corrosión de la Armadura.

RODRIGUEZ, J.; AROGONCILLO, J.; ANDRADE, C.; IZQUIERDO, D.
Manual CONTECVET IN 309021

<http://webs.demasiado.com/forjados/patología/corrosión.htm>

7 MARIA JOSE SANCHEZ DE ROJAS NOGUERA. (2004).

Tesis de Doctorado "Extracción Electroquímica de Cloruros del Hormigón Armado: Estudio de Diferentes Variables que Influyen en la Eficiencia del Tratamiento"

Directores de Tesis: Miguel Ángel Climent Llorca y Pedro Garcés Terradillo.
Departamento de la Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica Superior de Alicante.

<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=13870&ext=pdf&portal=0>
<http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/04702848688026806532268/013870.pdf>

8 "MÉTODOS DE REPARACIÓN AVANZADOS".

Avances en Métodos de Reparación de Estructuras de Concreto/Buenos Aires 11 y 12 de Octubre de 2007.

http://www.aahes.org.ar/documents/Jose_FulleaGarcia-Metodosavanzadosdereparacion.pdf

