



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN DEL REFUERZO DEL HORMIGÓN ARMADO FRENTE A LA ACCIÓN DE IONES CLORURO”

Tesis para optar al Título de:
Ingiero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Sr. Carlos Cabezas Cuevas
Magister en Ciencias, mención Química

Profesor Co-Patrocinante:
Sr. Ernesto Zumelzu Delgado
Ingeniero Civil Metalúrgico
Doctor en Materiales, Energía y Medioambiente

CLAUDIA MACARENA DE LA FUENTE LÓPEZ
VALDIVIA – CHILE
2015

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Cecilia López y Claudio De La Fuente, por su ayuda durante esta etapa y su incondicional apoyo durante todas las etapas de mi vida. Gracias por impulsarme siempre a llegar a este momento.

A mis profesores guías, Don Carlos Cabezas y Don Ernesto Zumelzu, por su disposición y apoyo durante este trabajo. Muchas gracias por su ayuda y por acercar a los estudiantes al mundo de la investigación.

Al profesor Sr. Ricardo Silva, gracias por su tiempo, disposición y por mostrarme un poco de su interesante trabajo.

A los profesores Sr. Pablo Oyarzun, Sr. Víctor Triviño y a Don Luis, por brindarme su ayuda en distintas etapas de este trabajo.

A la planta de hormigones Ready Mix Valdivia, por proporcionar el hormigón necesario para la investigación. Gracias al Sr. Cesar Zumelzu, gerente zonal, por su aporte en ideas, información y por interesarse en este tema de investigación desde un comienzo.

A José Manuel, mi compañero de vida y quien me motiva a seguir adelante siempre.

Dedicatoria

*A José López, el “Tata José”, por ser
un gran ejemplo de vida.*

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal identificar y analizar el comportamiento del acero de refuerzo del hormigón armado frente a la acción corrosiva de una fuente externa de iones cloruros, evaluando en el tiempo los efectos producidos para distintos recubrimientos de la armadura, producto de la inmersión en una solución salina.

El estudio inicia con una revisión bibliográfica que contempla aspectos determinantes sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado sometidas en ambientes agresivos, la acción química del cloruro sobre ellas, factores determinantes en el proceso corrosivo y la normativa existente. Posteriormente, se simula en el tiempo la acción corrosiva sumergiendo probetas de hormigón armado con tres recubrimientos distintos, para un hormigón con una determinada resistencia a la compresión, en una solución con una concentración de iones cloruros establecida; evaluando en el tiempo la difusión del ión Cl^- sobre la masa de hormigón, el potencial eléctrico sobre la armadura, los cambios de concentración en la solución de inmersión, finalizando con el análisis del daño producido en la superficie mediante microscopía electrónica y microanálisis.

SUMMARY

The following research has as main objective identify and analyze the behavior of the steel reinforcement of concrete against of the corrosive action of an external source of chloride ions, evaluating in the course of time the effects of different coatings for the armature, due to immersion in a saline solution.

The study begins with a bibliographic review that includes determinant aspects about the durability of reinforced concrete structures subjected to aggressive environments, the chemical action of chloride on them, determinant factors in the corrosion process and the existing normative. Subsequently, there is simulated in the course of time the corrosive action by immersing concrete specimens with three different coatings, for concrete with a certain compressive strength, in a solution with a predetermined concentration of chloride ions; evaluating in the course of time Cl^- ion diffusion on the concrete mass, the electric potential on the armature, concentration changes in the dipping solution, ending with the analysis of the damage caused on the surface by electron microscopy and microanalysis.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	I
SUMMARY.....	II
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE	1
1.2.1 Condición de exposición de las estructuras.	1
1.2.2 Caracterización del hormigón.....	2
1.2.3 Acero de refuerzo.....	4
1.2.4 Estado superficial del recubrimiento.....	5
1.2.5 Vida útil de las estructuras.	6
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4 METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS	10
2.1 DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO ...	10
2.1.1 Durabilidad	10
2.1.1.1 Principales problemas de durabilidad	11
2.1.2 Exposición de las estructuras al ambiente marino.....	11
2.1.2.1 Acción agresiva del agua de mar.....	11
2.1.3 Categorías y clases de exposición	12
2.1.3.1 Factores que influyen en la exposición marina	13
2.1.4 Fases de deterioro de las estructuras	14

2.1.4.1	Vida útil	14
2.2	CORROSION DEL ACERO EN EL HORMIGON	16
2.2.1	Corrosión: Generalidades.....	16
2.2.2	La corrosión como proceso electroquímico	16
2.2.2.1	Potencial de electrodo	17
2.2.2.2	Electrodos de referencia.....	18
2.2.2.3	Celda electroquímica	18
2.2.2.4	Potencial electroquímico.....	20
2.2.3	Pasivación del acero en el hormigón: el diagrama de Pourbaix	21
2.2.3.1	Naturaleza de la película pasiva	22
2.2.4	Proceso de la corrosión de las armaduras	23
2.2.4.1	Inicio de la corrosión activa.....	26
2.2.4.2	Modelo de Tuutti	27
2.2.4.3	Cinética de la corrosión	28
2.2.5	Tipos de corrosión de las armaduras	30
2.2.5.1	Corrosión generalizada.....	31
2.2.5.2	Corrosión localizada	31
2.2.5.3	Corrosión galvánica	32
2.3	ATAQUE POR CLORUROS EN EL ACERO DE REFUERZO.....	32
2.3.1	Acción de los cloruros	32
2.3.2	Tipos de cloruros dentro del hormigón	34
2.3.3	Procedencia de los cloruros	35
2.3.3.1	Fuentes internas y su normativa.....	35
2.3.3.2	Fuentes externas	36
2.3.4	Penetración de los cloruros	36
2.3.4.1	Contenido crítico de cloruros	36
2.4	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN.....	38

2.4.1	Recubrimiento	38
2.4.2	Espesor de recubrimiento.....	38
2.4.3	Curado del hormigón	39
2.4.4	Resistencia a la compresión.....	39
2.4.5	Relación agua/cemento	40
2.4.6	Cemento.....	40
2.4.7	Tamaño máximo de árido.....	41
2.4.8	Inhibidores de corrosión	42
2.4.9	Estado superficial del acero.	43
2.4.10	Condiciones ambientales	43
2.4.11	Fisuración del hormigón.....	43
2.5	MÉTODOS PARA EVALUAR LA CORROSIÓN DEL HORMIGÓN	45
2.5.1	Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo.....	46
CAPÍTULO 3:	PREPARACIÓN EXPERIENCIA DE LABORATORIO.....	48
3.1	CONFECCIÓN DE PROBETAS	48
3.1.1	Confección de moldajes	49
3.1.1.1	Materiales	49
3.1.1.2	Procedimiento.....	49
3.1.2	Muestras de hormigón.....	51
3.1.2.1	Características de los componentes del hormigón	52
3.1.2.2	Proceso de hormigonado.....	52
3.1.2.3	Curado y desmolde.....	54
3.2	PREPARACIÓN DE EXPERIENCIA.....	54
3.2.1	Preparación de solución salina.....	54
3.2.2	Tiempos de exposición.....	55
CAPÍTULO 4:	EXPERIENCIA DE LABORATORIO	56
4.1	INTRODUCCIÓN	56
4.2	MEDIDA DE POTENCIAL ELECTRICO	57

4.2.1	Materiales y equipos utilizados	57
4.2.2	Procedimiento	58
4.2.3	Resultados obtenidos	59
4.2.3.1	Gráficos	61
4.2.4	Discusión de resultados de medida de potencial eléctrico.	63
4.2.4.1	Variación del potencial de estabilización para probetas calificadas como MB, en el tiempo y espesor del recubrimiento	64
4.3	DIFUSION DEL ION CL ⁻	65
4.3.1	Muestras de polvo de hormigón	65
4.3.2	Determinación de concentración de cloruro	67
4.3.2.1	Método de Mohr.....	67
4.3.2.2	Procedimiento experimental	68
4.3.2.3	Cálculo concentración de cloruro (ppm)	70
4.3.3	Resultados obtenidos	72
4.3.3.1	Gráficos	74
4.3.4	Discusión de resultados de difusión de ion Cl ⁻	78
4.3.4.1	Difusión de iones cloruro en probetas calificadas MB	80
4.4	EL HORMIGÓN COMO MATERIAL NO HOMOGÉNEO	81
4.5	VARIACION DE CONCENTRACION DE CL ⁻ DE SOLUCION DE INMERSION.....	82
4.5.1	Procedimiento	82
4.5.2	Determinación de la variación de concentración	83
4.5.3	Resultados obtenidos	87
4.5.4	Discusión de resultados de variación de concentración en solución de inmersión.....	88
CAPÍTULO 5:	CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO EN EL ACERO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	89
5.1	INTRODUCCIÓN	89
5.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	90

5.3	ANÁLISIS DE MUESTRAS DE ACERO	92
5.3.1	Análisis muestra de acero D0 con limpieza en ultrasonido (D0 _{ultra}).....	92
5.3.2	Análisis muestra de acero D8 con limpieza en ultrasonido (D8 _{ultra}).....	93
5.3.3	Análisis muestra de acero de probeta A8 con limpieza en seco (A8 _{seco}).....	94
5.3.4	Análisis muestra de acero de probeta A8 con limpieza en ultrasonido (A8 _{ultra})	96
5.3.5	Análisis muestra de acero de probeta B8 con limpieza en seco (B8 _{seco})	98
5.3.6	Análisis muestra de acero de probeta B8 con limpieza con ultrasonido (B8 _{ultra}).....	100
5.3.7	Análisis muestra de acero de probeta C8 con limpieza en seco. (C8 _{seco})	102
5.3.8	Análisis muestra de acero de probeta C8 con limpieza con ultrasonido (C8 _{ultra})	104
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	105
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....		107
6.1	CONCLUSIONES	107
6.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	108
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....		109
CAPÍTULO 8: ANEXOS.....		113
8.1	ANEXO A: CLASES DE CONCRETO CATEGORIZADO SEGÚN APLICACIÓN	113
8.2	ANEXO B: CONCENTRACIÓN DE CL⁻ (PPM)	115
8.3	ANEXO C: CÁLCULO VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE INMERSIÓN	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Concentración de cloruros solubles v/s profundidad, para probetas con relación a/c 0,4, sumergidas en solución salina (INM) y expuestas a niebla salina (N.S).	2
Figura 1.2. Efectos producidos en probetas sumergidas 34 semanas en solución de NaCl para distintas relaciones agua/ cemento.	3
Figura 1.3. Barra de acero galvanizado después de 24 ciclos de exposición.	5
Figura 1.4. Velocidades de penetración de iones cloruro medida en kg/día para diferentes tipos de revestimientos.	6
Figura 1.5. Esquema general de comprobación de durabilidad.	7
Figura 2.1 Condiciones para evitar problemas de durabilidad.	10
Figura 2.2. Tipos de exposición marina.	12
Figura 2.3. Fases de deterioro de las estructuras.	14
Figura 2.4. Vida útil de una estructura.	15
Figura 2.5. La corrosión como proceso inverso de la metalurgia extractiva.	16
Figura 2.6. Celda electroquímica.	19
Figura 2.7. Pila de Daniell.	20
Figura 2.8. Diagrama potencial-pH para el acero en solución acuosa.	21
Figura 2.9. Corrosión de las armaduras en el hormigón.	23
Figura 2.10. Mecanismo de corrosión por efecto de carbonatación.	24
Figura 2.11. Representación electroquímica del acero y el concreto.	25
Figura 2.12. Los volúmenes relativos de hierro y su producto de reacción.	26
Figura 2.13. Modelo de vida útil de Tuutti.	27
Figura 2.14. Relación de riesgos asociados a niveles de velocidad de corrosión según distintos autores.	30
Figura 2.15. Tipos de corrosión de armaduras en el hormigón.	31
Figura 2.16. Esquema del fenómeno electroquímico de la corrosión por Cl-.	33
Figura 2.17. Corrosion por picadura a causa de cloruros.	34
Figura 2.18 Contenido critico de cloruros en función de la humedad ambiente, la calidad del hormigón y su posible carbonatación.	37
Figura 2.19. El recubrimiento como factor determinante de la corrosión.	38

Figura 2.20. Permeabilidad v/s relación agua/cemento, para hormigones con distintos tamaños máximos de áridos.....	42
Figura 2.21. Ejemplo de fisuras intrínsecas en una estructura de hormigón hipotética.	44
Figura 3.1. Tipos de probetas fabricadas.....	48
Figura 3.2. Confección de moldajes.....	50
Figura 3.3. Modelo esquemático del moldaje de la probeta "C"	51
Figura 3.4. Proceso de compactación de probetas.....	53
Figura 3.5. Probetas hormigonadas.....	53
Figura 3.6. Preparación solución salina.	54
Figura 4.1. Composición Electrodo de ref Cu/CuSO ₄	57
Figura 4.2. I) Solución de CuSO ₄ . II) Electrodo de referencia Cu/CuSO ₄ . III) Voltímetro.	58
Figura 4.3. Procedimiento medida de potencial.	58
Figura 4.4. Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 7 días de exposición.	61
Figura 4.5. . Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 28 días de exposición.	62
Figura 4.6. Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 68 días de exposición.	62
Figura 4.7. Probetas tiempos 1, 2, 3 y 4 secas luego de ser expuestas a solución salina.	65
Figura 4.8. Toma de muestras de polvo de hormigón.....	66
Figura 4.9. Perforaciones para cada tipo de probeta.	67
Figura 4.10. Método de Mohr (Parte 1).	69
Figura 4.11. Método de Mohr (Parte 2).	70
Figura 4.12. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas A.	74
Figura 4.13. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas B.	74
Figura 4.14. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas C.	75
Figura 4.15. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 1 cm.	75
Figura 4.16. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 2 cm.	76
Figura 4.17. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 3 cm.	76
Figura 4.18. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 4 cm.	77
Figura 4.19. Concentración de cloruro v/s radio para probetas A.	77
Figura 4.20. Concentración de cloruro v/s radio para probetas B.	78
Figura 4.21. Concentración de cloruro v/s radio para probetas C.	78
Figura 4.22. Muestra de polvo de hormigón.....	82

Figura 4.23. Obtención concentraciones de Cl- mediante método de Mohr.....	83
Figura 5.1. Acero sumergido en solución de NaCl. Fuente	89
Figura 5.2. Preparación de muestras de acero para análisis por SEM y EDAX.....	91
Figura 5.3. Muestra de acero D0 _{ultra} con microscopía electrónica de barrido (10µm).	92
Figura 5.4. Microanálisis muestra D0 _{ultra}	92
Figura 5.5. Muestra de acero D8 _{ultra} con microscopía electrónica de barrido (20µm).	93
Figura 5.6. Microanálisis muestra D8 _{ultra}	94
Figura 5.7. Muestra de acero A8 _{seco} con microscopía electrónica de barrido (100µm).....	94
Figura 5.8. Microanálisis muestra A8 _{seco}	95
Figura 5.9. Muestra de acero A8 _{ultra} con microscopía electrónica de barrido (100µm).....	96
Figura 5.10. Microanálisis muestra A8 _{ultra}	97
Figura 5.11. Muestra de acero B8 _{seco} con microscopía electrónica de barrido (10µm).	98
Figura 5.12. Microanálisis muestra B8 _{seco}	99
Figura 5.13. Muestra de acero B8 _{ultra} con microscopía electrónica de barrido (100µm).	100
Figura 5.14. Microanálisis muestra B8 _{ultra}	101
Figura 5.15. Muestra de acero C8 _{seco} con microscopía electrónica de barrido (10µm).	102
Figura 5.16. Microanálisis muestra C8 _{seco}	103
Figura 5.17. Muestra de acero C8 _{ultra} con microscopía electrónica de barrido (10µm).....	104
Figura 5.18. Microanálisis muestra C8 _{ultra}	105
Figura A.1. Categorías y clases de exposición.	113
Figura A.2. Requisitos para el concreto según la clase de exposición.....	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Categoría C y sus clases de exposición.....	13
Tabla 2.2. Cantidad máxima de Cl- como protección contra la corrosión.	36
Tabla 3.1. Tipos de probetas.	48
Tabla 3.2. Tiempos de exposición.....	55
Tabla 4.1. Valoración estado superficial de probetas.....	56
Tabla 4.2. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo A.....	59
Tabla 4.3. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo B.....	60
Tabla 4.4. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo C.	60
Tabla 4.5. Variación de potencial (mV) para probetas clasificadas MB.	64
Tabla 4.6. Concentración de Cl ⁻ presente en el hormigón de las probetas tipo A (ppm).....	72
Tabla 4.7. Concentración de Cl ⁻ presente en el hormigón de las probetas tipo B (ppm).....	73
Tabla 4.8. Concentración de Cl ⁻ presente en el hormigón de las probetas tipo C (ppm).....	73
Tabla 4.9. Difusión de iones cloruros en probetas MB.....	80
Tabla 4.10. Concentración de Cl- (ppm) repetida en algunas probetas.....	81
Tabla 4.11. Ppm de NaCl promedio.	81
Tabla 4.12. Peso promedio de probeta.	86
Tabla 4.13. gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión.....	87
Tabla 4.14. gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas.....	87
Tabla 4.15. Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión.....	88
Tabla 5.1. Grupo de muestras analizadas mediante microscopía electrónica de barrido.	90
Tabla 5.2. Daño estructura metálica a los 68 días de inmersión, para muestras preparadas con ultrasonido.	105
Tabla B.1. Cálculo de concentración de Cl- de la totalidad de las probetas.	117
Tabla C.1. gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión.....	117
Tabla C.2. gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas.	118
Tabla C.3. Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión.	119

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen muchas estructuras de hormigón armado que expuestas a ambientes agresivos muestran un buen desempeño a lo largo de los años y muchas otras han alcanzado el fin de su vida útil antes de lo proyectado, generando preocupación por parte de autoridades, y afectando la imagen del hormigón armado como material que se conserva en el tiempo.

El hormigón armado es un material mixto constituido por una matriz de hormigón y reforzada por barras de acero. La asociación acero-hormigón contempla la protección que el segundo ofrece al primero frente a ambientes de exposición. Debido a su durabilidad en el tiempo, gran resistencia a la compresión en relación a otros materiales y el carácter monolítico que le confiere a sus estructuras; hace del hormigón armado un material muy utilizado en la concepción de grandes construcciones, sin embargo, presenta el problema de ser susceptible a manifestar fallas por corrosión.

La presencia de agentes agresivos tales como sales marinas, los ciclos de hielo y deshielo en zonas frías o simplemente el agua que por medio de fisuras en el hormigón hace contacto con la armadura, constituye un problema bastante recurrente considerando la variada geografía de nuestro país. Es por esta razón que siempre existe la inquietud de otorgar mayor protección a las estructuras, aumentando su vida útil y permitiendo que sean capaces de resistir sin problemas una vida de servicio establecida.

En regiones marinas el principal agente agresivo son los cloruros, produciendo corrosión del refuerzo metálico de las estructuras de concreto, afectando de forma significativa sus propiedades funcionales; provocando problemas de adherencia, agrietamiento, e incluso desprendimiento de trozos de concreto. Esto genera importantes pérdidas económicas, y lo más preocupante, peligro de la integridad física de las personas.

En esta problemática se enmarca esta investigación, la que consiste el estudio del proceso corrosivo que ocurre en las armaduras de refuerzo de estructuras de concreto frente al ataque de iones cloruro, mediante un análisis experimental de este proceso; con el propósito de caracterizar y analizar el ataque considerando una concentración de iones cloruros similar a la que posee el agua de mar. De esta forma se pretende aportar

conocimientos en relación a las propiedades del hormigón armado sometido a estas condiciones, para ser considerados posteriormente al momento de edificar y establecer controles de calidad.

1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE

Con el fin de conocer el comportamiento de las estructuras de hormigón armado expuestas a una fuente externa de cloruros, resulta necesario realizar procedimientos experimentales y analizar bajo condiciones determinadas la difusión del ion cloruro. Estas condiciones varían desde la composición del hormigón armado, hasta las condiciones de penetrabilidad de los cloruros.

El estudio del comportamiento del hormigón armado en condiciones establecidas, permite conocer las variantes que determinan el grado de protección otorgado al acero del hormigón, su factibilidad de utilización y los costos implicados. El análisis de propiedades directas como la carbonatación y el ingreso de cloruros, además de otras indirectas como la absorción de agua, permeabilidad al agua y al aire, porosidad y resistividad eléctrica; permiten conocer el comportamiento y otorgar aportes a este tema de estudio.

1.2.1 Condición de exposición de las estructuras.

Las estructuras expuestas a un ambiente marino pueden presentar corrosión debido a la presencia de cloruros, según la zona en que se encuentre el hormigón armado. No son iguales los efectos producidos en el hormigón sumergido en el agua de mar, que los producidos en el expuesto a una atmósfera marina o el ubicado en la zona de mareas.

Las diferencias en la concentración de cloruros en el hormigón armado para distintas condiciones de exposición resultan un tema de interés. Así, Castañeda A., et al (2005), compara en su investigación las concentraciones de cloruros solubles y totales, para probetas sumergidas en una solución de NaCl al 3% en temperatura ambiente y probetas expuesta a la intemperie simulando artificialmente una agresión corrosiva costera. Luego de 34 semanas de exposición a estas condiciones, para hormigones con una misma relación agua - cemento, se observa que las probetas sumergidas presentan niveles superficiales mayores que las expuestas a niebla salina a la intemperie. Sin embargo, estos resultados tienen directa relación con la profundidad a la que se realice el análisis, ya que al avanzar hacia el interior de la probeta, los valores de concentración varían, llegando a valores más elevados en las probetas sometidas a niebla salina. Esto se evidencia en el gráfico siguiente (Figura 1.1), donde se presentan los valores obtenidos para una relación agua/cemento de 0,4.

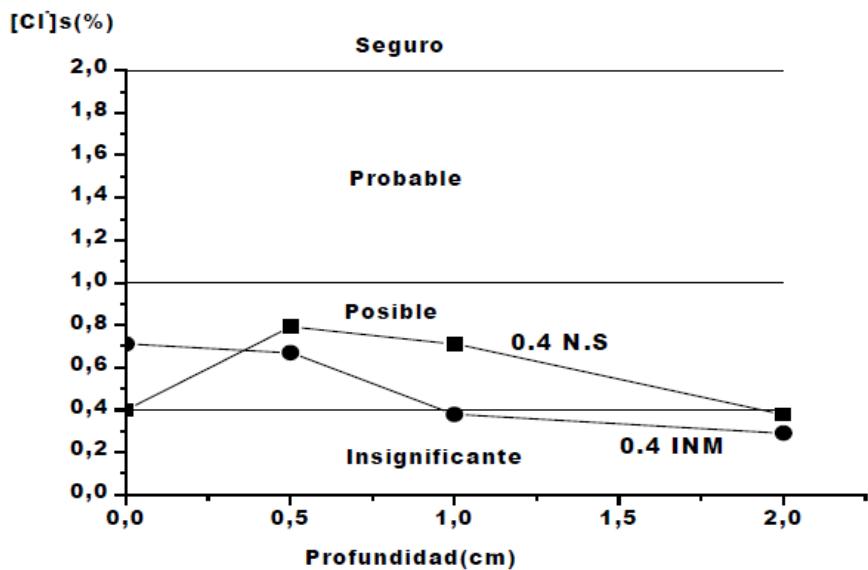


Figura 1.1. Concentración de cloruros solubles v/s profundidad, para probetas con relación a/c 0,4, sumergidas en solución salina (INM) y expuestas a niebla salina (N.S). Fuente: Castañeda A., et al (2005).

De esta forma, la condición de exposición de las estructuras corresponde a un parámetro determinante en las investigaciones realizadas sobre la penetración de cloruros en el hormigón armado y los resultados obtenidos.

1.2.2 Caracterización del hormigón.

Los componentes del hormigón armado corresponden a un factor determinante al analizar la difusión de los iones cloruro en las estructuras. La dosificación y las características de los componentes son una fuente de estudio importante, analizando diferentes relaciones agua/cemento, resistencia a la compresión y tipos de cementos.

El grado de protección que otorga el tipo de cemento a una estructura, se evidencia comparando experimentalmente hormigones armados fabricados con distintos cementos. Los distintos tipos de cemento pueden presentar diferencias en su composición, siendo relevantes las cantidades de aluminato tricálcico (C_3A), óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O).

El C_3A ayuda a retener iones cloruro disminuyendo el contenido de iones libres y a su vez, el Na_2O y el K_2O otorgan al hormigón un pH más básico, permitiendo que los productos de corrosión en el refuerzo sean

más estables. Así, el mayor contenido de aluminato tricálcico disminuye la difusión de los cloruros en el hormigón, dejándolos como ligados, debido a la formación de la denominada sal de Friedel.

Vera R., et al (2013), en su publicación denominada “Efecto de la difusión de ion cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado. Resultados preliminares”, analiza la difusión del ion cloruro en el cemento Portland puzolanico y Portland corriente, comprobando experimentalmente, que si bien la absorción capilar del hormigón fabricado con cemento puzolánico es menor (mayor impermeabilidad), no otorga una mayor protección el uso de puzolanas en comparación con el hormigón corriente. Esto último, producto del mayor contenido de C_3A que posee el cemento Portland corriente, que favorece la formación de sal de Friedel y otorga una mayor protección al acero de refuerzo.

La relación agua/cemento también constituye un factor de importancia. Numerosas investigaciones realizan procedimientos experimentales con altas relaciones agua/cemento con el fin de conocer los efectos del ion cloruro a corto plazo. De esta forma, la investigación señalada anteriormente (Castañeda et al., 2005), analiza probetas de hormigón sumergidas en solución salina, con relaciones agua/cemento de 0.4, 0.5 y 0.66, obteniendo una velocidad de corrosión mucho más elevada para las dos últimas.

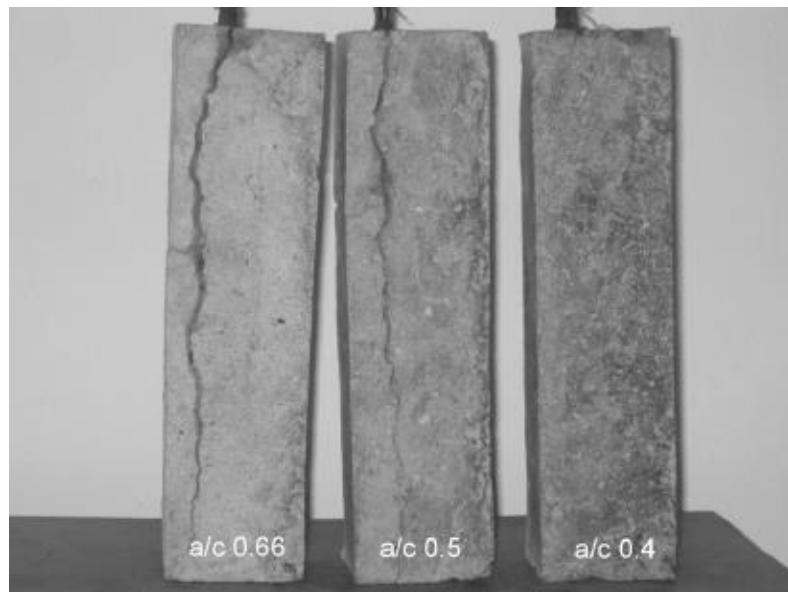


Figura 1.2. Efectos producidos en probetas sumergidas 34 semanas en solución de NaCl para distintas relaciones agua/cemento. Fuente: Castañeda A., et al (2005).

El grado de protección que otorga la resistencia a la compresión del hormigón armado a las estructuras, es estudiado por Bermúdez, M. (2007), en el marco del estudio de siete muelles españoles construidos con

cajones flotantes, con parte de su estructura sumergida en agua de mar entre 2 y 31 años. Así, por medio del análisis de muestras testigos, no considera el control de la resistencia a la compresión como un factor determinante de protección de las estructuras, señalando que se pueden fabricar hormigones de similar resistencia y durabilidad muy diferente. Sin embargo, con este tipo de análisis experimental no es posible verificar las resistencias a la compresión de los hormigones utilizados, ya que son obtenidos de los proyectos de los mismos y no permite verificar las condiciones de hormigonado, ni el estado superficial inicial de la estructura.

1.2.3 Acero de refuerzo.

La degradación de las armaduras del hormigón armado corresponde a un tema de múltiples estudios, debido a los efectos perjudiciales que provoca en las estructuras y la necesidad de protegerlas.

El acero galvanizado está siendo cada vez más utilizado como refuerzo en estructuras que requieren mayor exigencia de durabilidad, y dado el mayor costo que implica su utilización, se investiga cada vez más el grado de protección que aporta, versus la utilización de acero de refuerzo convencional.

El efecto de la difusión de ion cloruro en el comportamiento del acero galvanizado y las diferencias presentadas con la utilización del acero al carbono, fueron estudiadas por Vera R., et al (2013), mediante la fabricación de dos tipos de probetas cúbicas de hormigón armado, una con cemento Portland corriente y la otra con Portland puzolánico, ambas con dos barras de acero de carbono y dos de acero galvanizado. Ambos tipos de probetas fueron sometidas a 24 ciclos de cuatro días de semi inmersión en solución de NaCl al 3,5% p/p (aumentando a 2.56 M en los últimos 5 ciclos) y tres días de secado a 60 °C. Conociendo la composición de los cementos según los datos del fabricante y la dosificación del hormigón, determina por medio de ensayos la resistencia a la compresión, resistividad eléctrica y absorción capilar. Finalmente, mediante muestras de polvo de hormigón, medida electroquímica y análisis por microscopía electrónica de barrido, se observa que el acero galvanizado presenta pasividad frente a los ciclos de semiinmersión/secado realizados (Figura 1.3), en cambio, la barra de acero al carbono alcanza en el ciclo 12 un contenido de cloruro/cemento de 0,7%, encontrándose en proceso de corrosión.



Figura 1.3. Barra de acero galvanizado después de 24 ciclos de exposición. Fuente: Vera R., et al (2013)

1.2.4 Estado superficial del recubrimiento.

El estado del recubrimiento del acero en el hormigón armado es determinante para otorgar protección a las estructuras frente a un ambiente corrosivo. Un recubrimiento de “mala calidad” puede generar fisuras, permitiendo que el cloruro llegue al acero, dando lugar la formación de corrosión localizada.

Los procesos de hormigonado y fraguado del concreto son determinantes para la posterior formación de fisuras, destacando las producidas por perdida de agua en el concreto recién colocado (figuración plástica) y por pedida de agua en el concreto después de fraguar (fisura producto de contracción por secado). Esta última depende del contenido de agua y de los agregados, de forma que a mayor cantidad de agregado y mientras más rígido sea este, el concreto tendrá una mejor respuesta a la contracción por secado (Vidaud, E, 2013).

Para proteger el recubrimiento en hormigones sometidos a ambiente marino, existen métodos superficiales de protección contra la corrosión. Un análisis experimental de estos métodos lo realiza Carvajal A., et al (2006), aplicando a tres tipos de probetas cubicas de hormigón armado ($a/c: 0.45$ y 0.55) recubrimientos superficiales del tipo cementicio, acrílico y poliuretano. Luego somete las probetas a la acción acelerada de una disolución concentrada de iones cloruro y sulfato (250 g/l de cloruro de sodio y 25 g/l de sulfato de magnesio), mediante semi inmersión. De esta forma, se efectuó el estudio de la variación de masa y de velocidad de penetración de iones cloruro, concluyendo que entre los tres tipos de revestimientos utilizados, el poliuretano presenta un mejor comportamiento frente al ataque de iones cloruros, siendo el cementicio de peor calidad.

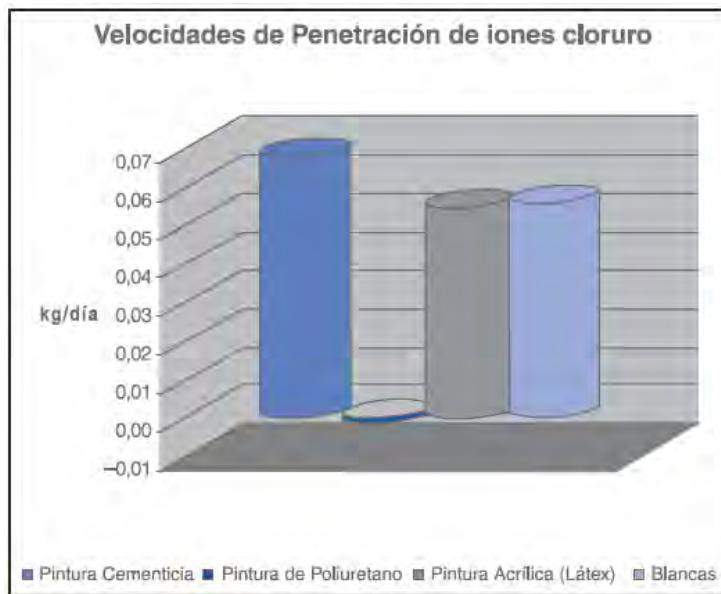


Figura 1.4. Velocidades de penetración de iones cloruro medida en kg/día para diferentes tipos de revestimientos. Fuente: Carvajal A., et al (2006).

1.2.5 Vida útil de las estructuras.

El cálculo de la vida útil estimada puede ser realizado basado en los requisitos estipulados en la normativa vigente, la realización de ensayos que verifiquen valores umbrales y por medios de modelos de predicción. Andrade, C. (2013), en su publicación “Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de la corrosión”, presenta un esquema general de comprobación de la durabilidad de las estructuras, estableciendo inicialmente si el final de la vida útil corresponde al comienzo de la corrosión de la armadura, o a la probabilidad de fallo o corrosión (Figura 1.5). Finalmente, este autor señala la necesidad de avanzar en la aplicación de modelos e indicadores de la durabilidad en la normativa vigente.

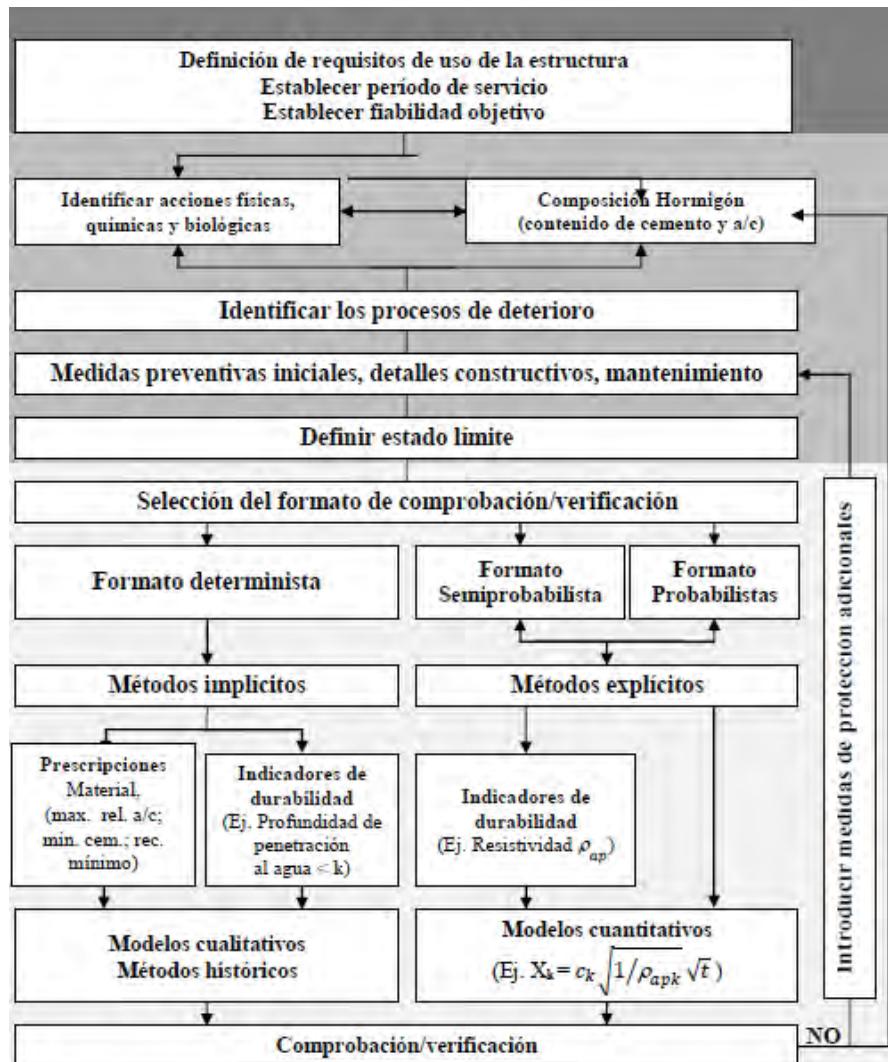


Figura 1.5. Esquema general de comprobación de durabilidad. Andrade, C. (2013)

Un objeto de estudio relevante constituye el cálculo de la vida útil de las estructuras mediante la realización de modelos de estudio de corrosión inducida por cloruros alternativos a los existentes. Estos modelos actuales permiten incluir una mayor cantidad de aspectos determinantes de los efectos corrosivos en el tiempo y un acercamiento más próximo a las situaciones reales.

Guzmán S., et al (2007), genera un modelo de estudio de la corrosión inducida por cloruros, específicamente para el estudio de la figuración del hormigón. Este modelo incluye aspectos propios del hormigón como material (porosidad, humedad y temperatura) y las condiciones del ataque por cloruros, como concentración del ion cloro, gradiente de concentración, transferencia de calor y humedad relativa; además de permitir incluir estados de figuración que conducen a la rotura del recubrimiento del hormigón armado. Dentro

de las aplicaciones del modelo destaca la de proporcionar información sobre los tiempos necesarios para que se produzca corrosión en las armaduras de puentes y el posible agrietamiento en torno a la barra por expansión del óxido.

Las investigaciones relacionadas con la corrosión de la armadura por efecto de iones cloruro son objeto de variados estudios. Experimentalmente destaca el trabajo en base a comparación de probetas y ensayos realizados a las mismas, sin embargo, dados los tiempos elevados necesarios para obtener resultados, la caracterización del daño en el acero resulta más difícil de investigar.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Identificar y analizar el comportamiento del acero de refuerzo A44-28H del hormigón armado de tipo estructural H30 frente a la acción corrosiva de iones cloruro para diferentes recubrimientos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el grado de avance del cloruro en función del tiempo en el hormigón armado especificado.
- Evaluar y comparar el daño del acero de refuerzo especificado sometido al ataque de iones cloruros en periodos de tiempo determinados.
- Analizar las variaciones que se producen en la concentración de cloruros de la solución de inmersión.

1.4 METODOLOGÍA

Esta investigación comienza con una recopilación de información sobre los componentes y propiedades del hormigón armado, la acción química del cloruro sobre este material, la normativa chilena vigente, las técnicas de laboratorio existentes y las formas de evaluar este fenómeno experimentalmente de forma más adecuada.

En segunda instancia se fabricaron probetas de hormigón armado de tres diámetros distintos con una varilla de acero en su interior, permitiendo obtener resultados para tres dimensiones diferentes de recubrimientos del acero especificado de refuerzo. Posteriormente se preparó en laboratorio una solución salina con una determinada concentración de cloruros y se sumergieron en ella de forma simultánea las probetas debidamente rotuladas, con el fin de realizar análisis en distintos tiempos de exposición durante 68 días.

Luego de ser sumergidas las probetas se realizaron sucesivas mediciones de potencial eléctrico de la armadura en distintos períodos, se estableció la difusión del ión cloruro que se presentó sobre el concreto por medio de análisis en laboratorio y las variaciones en la concentración de la solución de inmersión durante la investigación; posteriormente se procedió a extraer el acero de las probetas y por medio de microscopía electrónica de barrido se evaluó y comparó el daño.

Finalmente, con los datos experimentales y observaciones obtenidas se establecieron conclusiones en relación al efecto de la corrosión por cloruros en el acero de refuerzo del hormigón.

CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO

2.1.1 Durabilidad

El ACI 201.2R (2001) "Guía para la Durabilidad del Hormigón", define la durabilidad del hormigón de cemento hidráulico como la capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Además, señala que un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.

Entre los ambientes de exposición el ambiente marino constituye la más dura prueba de durabilidad del hormigón armado, dada la variedad de compuestos químicos que posee, la humedad que se presenta y las temperaturas que se producen en las costas.

La posibilidad de mejorar la durabilidad del hormigón expuesto a ambiente marino se encuentra dada por definir de buena forma sus condiciones de exposición, de servicio, de construcción y las posteriores medidas de control (Figura 2.1).



Figura 2.1 Condiciones para evitar problemas de durabilidad. Fuente: Elaboración propia basada en Torrent R. (2010)

2.1.1.1 Principales problemas de durabilidad

Mehta, P. (1991) señala que las principales causas de deterioro de estructuras de hormigón, en orden decreciente de importancia, son:

- Corrosión de las armaduras de acero.
- Daño por congelación en climas fríos.
- Acciones físico-químicas en ambientes agresivos.

El concreto reforzado utiliza acero para aportarle las propiedades de resistencia a la tracción que son necesarias en el concreto estructural. Esto evita la falla de las estructuras de concreto que están sujetas a esfuerzos de tensión y flexión debido al tráfico, los vientos, las cargas muertas y los ciclos térmicos. Sin embargo, cuando el refuerzo se corroe, la formación de óxido conduce a la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto. Si esto se ha dejado sin revisar, la integridad de la estructura puede verse afectada. (NRMCA, 2005).

2.1.2 Exposición de las estructuras al ambiente marino

La exposición de las estructuras al ambiente marino constituye un tema de mucho estudio debido a la composición del agua de mar y su interacción con los componentes del hormigón.

Las aguas de mar presentan una composición química caracterizada por la presencia de un 3,5% de sales solubles en peso. Las mayores concentraciones iónicas son las de Na^+ y del Cl^- , que son de 11.000 y 20.000 mg/litro, respectivamente. También existen cantidades significativas de Mg^{2+} y SO_4^{2-} , normalmente de 1.400 y 2.700 mg/litro, respectivamente. El pH varía entre 7,5 y 8,4. (Mehta et al., 1991).

2.1.2.1 Acción agresiva del agua de mar

Existen diferentes tipos de exposición marina dependiendo de la zona en que se encuentre el hormigón con respecto al mar. Las zonas que se identifican son: (Figura 2.2).

- Zonas de atmósfera marina: En esta zona, el hormigón nunca está en contacto con el mar. Sin embargo, recibe sal procedente de la brisa marina y niebla salina. El nivel de cloruros decrecerá al aumentar la

distancia al mar. Dependiendo de la naturaleza de la costa y de los vientos dominantes, la sal puede ser transportada por muchos kilómetros hacia el interior.

- **Zonas de salpicaduras:** Esta zona está, por encima de la zona de marea alta, sujeta a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas y la espuma.
- **Zonas de mareas:** Esta zona está comprendida entre los niveles de marea alta y baja. El hormigón estará sumergido cíclicamente cada día.
- **Zona sumergida:** Es la zona por debajo del nivel de marea baja, en la cual el hormigón está permanentemente sumergido.
- **Zona enterrada:** Esta zona corresponde al fondo marino. Debe observarse que no existen unos límites definidos entre zonas y de hecho, cada zona se solapa con la siguiente. (IECA, 2013).



Figura 2.2. Tipos de exposición marina. Fuente: IECA. (2013).

2.1.3 Categorías y clases de exposición

El código ACI 318S. (2008) en su capítulo 4, “Requisitos de durabilidad”, define categorías de exposición subdivididas en clases de exposición, dependiendo del grado de severidad. En general, se definen 4 categorías: (ver anexo A).

- Categoría de Exposición F: para concreto exterior expuesto a la humedad y a ciclos de congelamiento y deshielo, con o sin productos químicos descongelantes.
- Categoría de Exposición S: para concreto en contacto con el suelo o agua que contenga cantidades perjudiciales de iones sulfatos solubles en agua.
- Categoría de Exposición P: para concretos en contacto con agua y que requieren baja permeabilidad.
- Categoría de Exposición C: para concreto reforzado y preesforzado expuesto a condiciones que requieren protección adicional del refuerzo contra la corrosión.

Así se define la Clase de exposición C2 (Tabla 2.1), que corresponde al concreto expuesto a la fuente de humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen. (ACI 318S, 2008).

CATEGORÍA	SEVERIDAD	CLASE	CONDICIÓN
"C" Protección del refuerzo contra la corrosión.	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido de la humedad.
	Moderado	C1	Concreto expuesto a la humedad pero no a fuentes externas de cloruros.
	Severo	C2	Concreto expuesto a la humedad y a fuentes externas de cloruros provenientes de químicos anticongelantes, sales, agua salobre, agua de mar o aerosol proveniente de estas fuentes.

Tabla 2.1. Categoría C y sus clases de exposición. Fuente: ACI 318S. (2008).

2.1.3.1 Factores que influyen en la exposición marina

Los factores que determinan la destrucción del concreto por agua de mar dependen de las zonas de exposición, en las cuales pueden identificarse los siguientes factores: (Cerna, 2010).

- Acción mecánica del oleaje.
- Evaporación provocada por el viento lo cual deposita las sales por encima del nivel de baja marea.
- Diferencia de mareas que favorece la acción destructiva debido a la cristalización de sales.
- Reacción química entre las sales del agua y el concreto, la cual favorece la corrosión del acero de refuerzo.

- Los organismos marinos y los productos de su actividad biológica.
- La acción destructiva debido a la corrosión y expansión del acero de refuerzo.

2.1.4 Fases de deterioro de las estructuras

Las estructuras expuestas a un ambiente marino y a un ambiente agresivo en general, presentan un deterioro que se genera en dos periodos. El periodo de iniciación o incubación, en el que las estructuras están expuestas a los agentes agresivos sin presentar aun un deterioro visible, y el periodo de propagación, donde inicialmente el deterioro es localizado para luego ser generalizado (Figura 2.3).

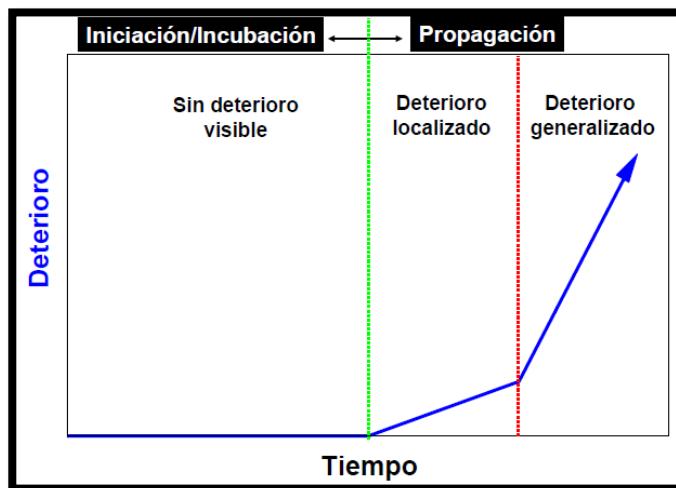


Figura 2.3. Fases de deterioro de las estructuras. Fuente: Torrent, R. (2011).

2.1.4.1 Vida útil

Se define la vida útil de una estructura como el periodo de tiempo después de la construcción durante el cual todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario. (ASTM E 632-82, 1996).

Se puede establecer un tiempo límite en el que la estructura mantiene las características del proyecto. Este tiempo puede depender del tipo de elemento (viga, pilar, etc.), solicitudes, seguridad (por ejemplo caso

de desprendimiento). Luego de este tiempo límite y hasta que se repare el daño, la estructura se encuentra en su vida residual, es decir, la estructura trabajaría siendo sobrepasados los requisitos del proyecto. Este tiempo límite se denomina vida útil de la estructura. (Figura 2.4).

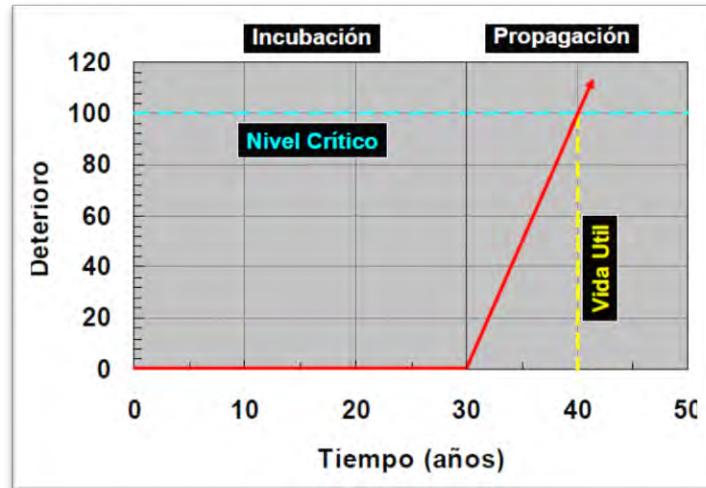


Figura 2.4. Vida útil de una estructura. Fuente: Torrent, R. (2011).

2.2 CORROSION DEL ACERO EN EL HORMIGON

2.2.1 Corrosión: Generalidades

La corrosión es la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y sus propiedades. (ASTM G15, 1993).

Los minerales en la naturaleza se encuentran en estado oxidado, ya que cedieron sus electrones de valencia a los átomos no metálicos formando un óxido o una sal. Por tanto, es necesario otorgarles energía para que recuperen los electrones perdidos y así recobren su estado metálico o elemental.

Así, la corrosión de los metales se considera como el proceso inverso de la metalurgia extractiva, ya que el hombre debe intervenir aplicando energía para transformar el mineral en un metal. Al obtener el metal, los átomos no se encuentran en su estado natural, por lo que siempre querrán volver a estar termodinámicamente estables y se oxidarán. (Figura 2.5).

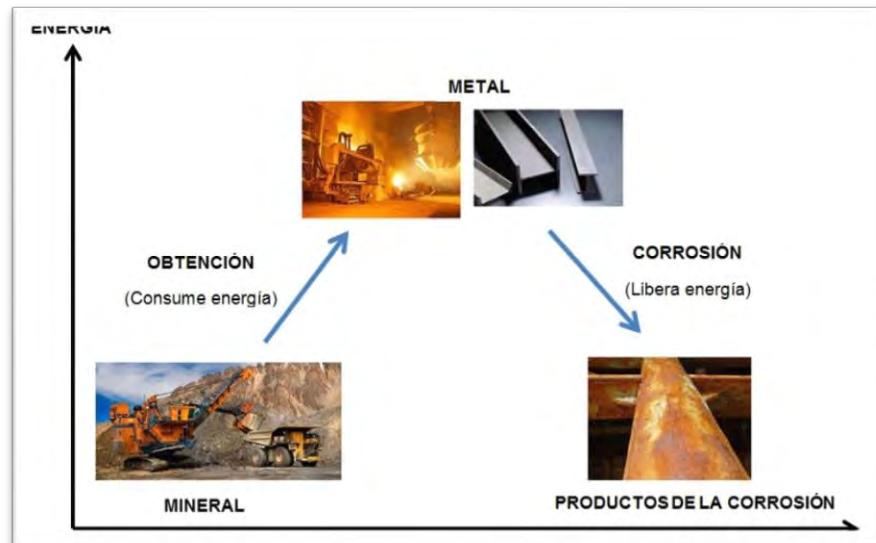


Figura 2.5. La corrosión como proceso inverso de la metalurgia extractiva. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 La corrosión como proceso electroquímico

La electroquímica es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación-reducción) en donde la energía

liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química. (Chang et all., 2002).

En una reacción redox se transfieren electrones de una sustancia a otra, produciendo un cambio en el número de oxidación de los elementos (número de electrones que participan en la unión química). De esta forma existe siempre un agente reductor, que corresponde a la molécula que posee el elemento que se oxidó (elemento que cede electrones) y un agente oxidante, que corresponde a la molécula que posee el elemento que se redujo (elemento que acepta electrones).

En el caso de la intervención de una solución acuosa, el mecanismo que se produce incluye reacciones químicas diferentes, con unas zonas de disolución del metal (zonas anódicas) y otras en que permanece inalterado (zonas catódicas), originándose así una pila, cuyo funcionamiento continuado requiere que exista un circuito eléctrico cerrado que incluye el ánodo, el cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito. (Bermúdez, 2007).

2.2.2.1 Potencial de electrodo

Los metales reaccionan de distintas formas, cada uno tiene diferente tendencia a oxidarse, por lo que cada metal tiene su propio potencial de electrodo. Esto se observa al sumergir un metal en una solución de sus cationes metálicos, si es el caso de un metal activo (zinc, magnesio, etc.), este se oxidará y pasará a la solución como iones, quedando el metal con un potencial negativo respecto a la solución. En un momento se logrará una diferencia de potencial que impedirá el paso de cargas alcanzando el equilibrio, es decir, se igualan las energías de los reactivos y los productos de la reacción.



Esto significa que “en esas condiciones” el metal es igualmente estable como átomo neutro en el sólido, que como catión metálico en solución. Y en “esas condiciones” significa que la reacción llegó a un equilibrio y que tiene asociado un Potencial de Electrodo de Equilibrio que es igual a la diferencia de potencial existente entre el metal y la solución de sus iones en el equilibrio. (Carranza et al., 2009).

2.2.2.2 Electrodos de referencia

Los electrodos de referencia son electrodos que poseen un potencial de equilibrio establecido. Son utilizados para realizar mediciones por comparación, ya que su potencial durante la medición no varía.

Los respectivos potenciales de equilibrio han sido medidos bajo condiciones normales establecidas:

- Concentración de ión metálico de 1mol/L.
- Presión de 1 atm.
- Temperatura 25 °C.

Se presentan como potenciales normales de reducción, por lo que mientras más positivo es el potencial tiende menos a oxidarse. El electrodo normal de hidrógeno (E_0) se establece como base de la tabla estándar de potenciales de electrodos, fijándose como 0.00 V.

Algunos potenciales normales de metales medidos en voltios con el electrodo estándar de hidrógeno son: (Carranza et al., 2009).

- $E_{oro} = +1,498$ V
- $E_{plata} = +0,799$ V
- $E_{cobre} = +0,342$ V
- $E_{hidrógeno} = +0,000$ V
- $E_{hierro} = - 0,447$ V
- $E_{cinc} = - 0,763$ V
- $E_{magnesio} = - 2,372$ V

2.2.2.3 Celda electroquímica

Las celdas electroquímicas son dispositivos capaces de obtener energía eléctrica a partir de reacciones químicas. Existen dos tipos, las galvánicas, con un sistema electroquímico espontáneo y las electrolíticas, con un sistema electroquímico no espontáneo.

Las pilas o celdas galvánicas pueden definirse como “la expresión física de un sistema espontáneo, completo, de óxido-reducción” (Villarreal, 1971). En ellas se genera una diferencia de potencial a partir de las reacciones de oxidación y reducción, obteniéndose energía eléctrica en forma espontánea.

Una celda electroquímica se encuentra formada por dos reacciones de semi-celda, cada una de las cuales tiene un potencial de electrodo. En un electrodo ocurre la oxidación de los metales y en el otro la reducción de sus cationes a la misma velocidad, generando una diferencia de potencial entre sus terminales externas, que se denomina fuerza electromotriz, fem o E_c . (Figura 2.6).

La fem puede expresarse, por convención, como:

$$E_c = E_{RED} - E_{OX} \quad (2)$$

Donde;

E_{RED} = Electrodo en el que se da la reducción.

E_{OX} = Electrodo en el que se realiza la oxidación.

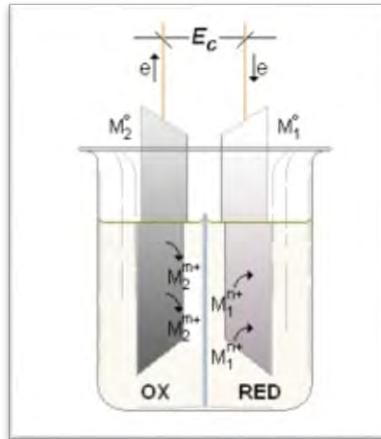


Figura 2.6. Celda electroquímica. Fuente: UAM. Fuerza electromotriz y potencial estándar (2006).

Un tipo de pila galvánica es la llamada Pila de Daniell (Figura 2.7); ésta se forma por la unión de una porción de cinc sumergido en 1M de $ZnSO_4$ y una porción de cobre sumergido en 1M de $CuSO_4$, divididos por una placa porosa que permite la continuidad eléctrica sin que se produzca la mezcla de ambas soluciones, donde ambos electrodos se encuentran unidos eléctricamente por contacto físico.

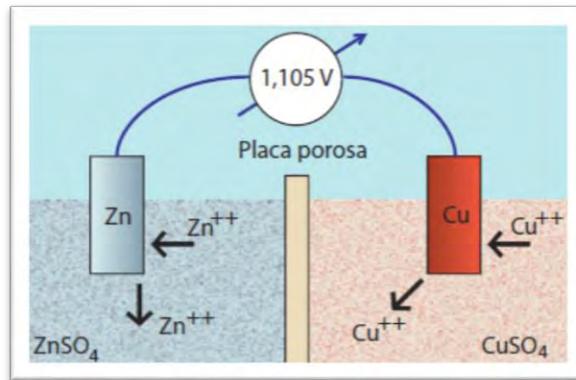


Figura 2.7. Pila de Daniell. Fuente: Carranza R., et al (2009).

La diferencia de potencial que se mide entre los dos electrodos corresponde a la diferencia entre los dos potenciales normales: (Carranza et al., 2009).

$$E_{pila} = E_{Cu} - E_{Zn} = 0,342 \text{ V} - (-0,763 \text{ V}) = 1,105 \text{ V} \quad (3)$$

Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: (Cerna, 2010).

- Un Ánodo, donde ocurre la oxidación.
- Un Cátodo, donde ocurre la reducción.
- Un Conductor Metálico donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- Un Electrolito, en ese caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada.

2.2.2.4 Potencial electroquímico

El potencial electroquímico es una medida de la facilidad de la transferencia de electrones de carga entre un metal y su entorno (Bermúdez, 2007).

Para realizar la medición del potencial electroquímico del hormigón armado, es necesario formar una celda electroquímica entre el acero y un electrodo de referencia, obteniendo de esta forma el valor absoluto del potencial, también llamado potencial de corrosión, de circuito abierto o libre. Así, los electrodos de referencia

más utilizados son el de hidrógeno estándar (SHE), de calomelanos saturado (SCE) y de Cu/CuSO₄ (CSE) (Pérez, 2010).

2.2.3 Pasivación del acero en el hormigón: el diagrama de Pourbaix

El estado de energía de un metal en una disolución electrolítica es fuertemente influenciado por el pH de la disolución y las características particulares del metal. Bajo estas consideraciones, Marcell Pourbaix desarrolló una forma sencilla de representar reacciones en un plano, tomando como coordenadas el pH y el potencial electroquímico, creando los denominados diagramas de Pourbaix o diagramas de estabilidad termodinámica (Figura 2.8). (IMT. Publicación técnica N°182, 2001).

La corrosión del acero de refuerzo se asocia principalmente a la baja del pH del concreto; pero para entender mejor este fenómeno, se debe recordar que el pH es simplemente el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. Este concepto sugiere que un pH de 7 indica que se tiene 10⁻⁷ iones gramo de hidrógeno por litro de solución, lo que corresponde a una solución neutra, mientras que un pH de 0 representa una solución muy ácida y uno de 14 una muy alcalina. (IMCYC, 2003).

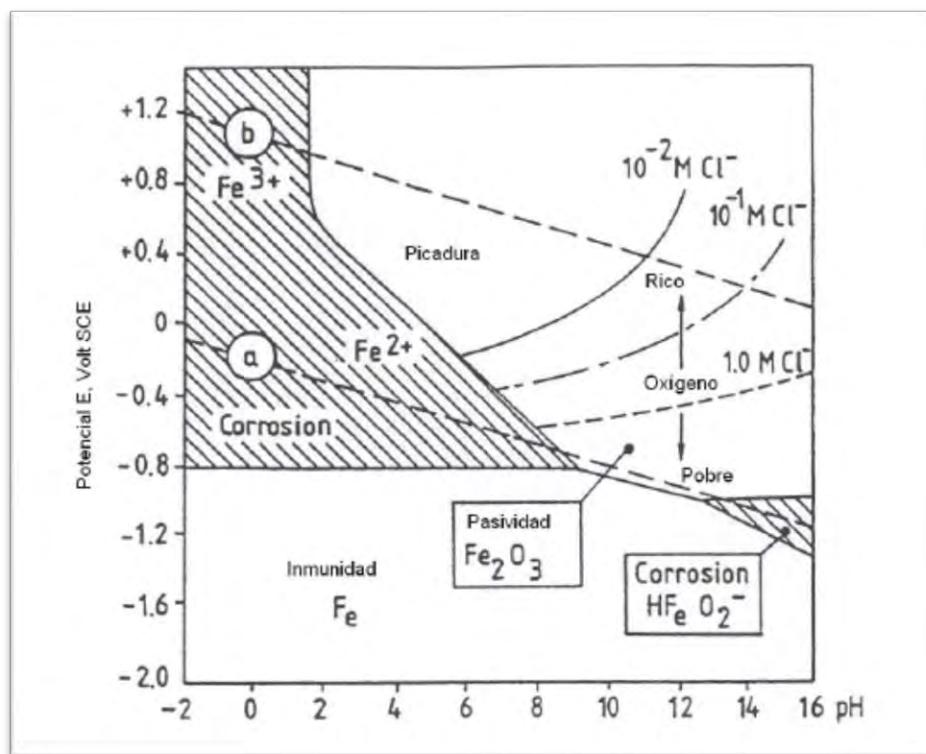


Figura 2.8. Diagrama potencial-pH para el acero en solución acuosa. Fuente: Bermúdez, M. (2007).

En general, todos los diagramas de Pourbaix presentan tres zonas:

- Zona de inmunidad: Predominan las reacciones de reducción y corresponde a la zona donde el material se encuentra en condiciones estables.
- Zona de corrosión activa: Predominan las reacciones de oxidación, causando la destrucción por combinación o disolución continuada del material.
- Zona de pasivación: Zona de corrosión en que se forma una película protectora que evita el avance del proceso de corrosión. La formación de imperfecciones en la misma conlleva a la aparición de corrosiones locales.

El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con la de pasividad. (Gaibor, 2005).

Cuando se reduce el pH dentro de una picadura en el hormigón armado y por ende se produce corrosión activa, el acero se ubica en la zona de Fe^{2+}/Fe^{3+} del diagrama. En el caso de un hormigón sumergido, al ser baja la disponibilidad de oxígeno en el acero, se ubica en la zona de alta resistencia a la corrosión por cloruros. Además, por medio de las líneas de isoconcentración que presentan los diagramas de Pourbaix, es posible determinar los límites de concentración aproximada de iones cloruros necesarios para destruir la capa pasiva y se produzca corrosión activa. (Sandberg, 1988).

2.2.3.1 Naturaleza de la película pasiva

La película pasiva actúa como barrera entre el acero y su entorno. Existen casos en que ésta capa protectora de óxido (Fe_2O_3) es gruesa, siendo capaz de proteger al acero. Sin embargo, generalmente suele ser de espesor muy pequeño, previniendo en distinto grado la corrosión activa en la superficie del acero. En general, una película pasiva no detiene la corrosión, pero si puede disminuir considerablemente su velocidad.

Para el acero en el hormigón, la velocidad de corrosión pasiva es típicamente $0,1 \mu\text{m/año}$; sin la película pasiva, el acero se corroerá en las tasas de al menos tres veces mayor magnitud que esto. (ACI. Comité 222R, 2001).

2.2.4 Proceso de la corrosión de las armaduras

La corrosión del acero en el hormigón es un proceso electroquímico, ya que ocurre producto de dos reacciones de media celda.

Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden generar de dos formas: (Bermúdez, 2007).

- Por pilas de composición que se forman cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existen variaciones significativas en las características superficiales del acero.
- Por pilas de concentración debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

De esta forma, en el hormigón armado con un solo tipo de metal, se puede producir la separación física de las reacciones de oxidación y de reducción (Figura 2.9). Así, se habla de una macrocelda cuando ambas reacciones ocurren en lugares muy separados, y de una microcelda cuando ocurren muy cerca o en el mismo lugar.

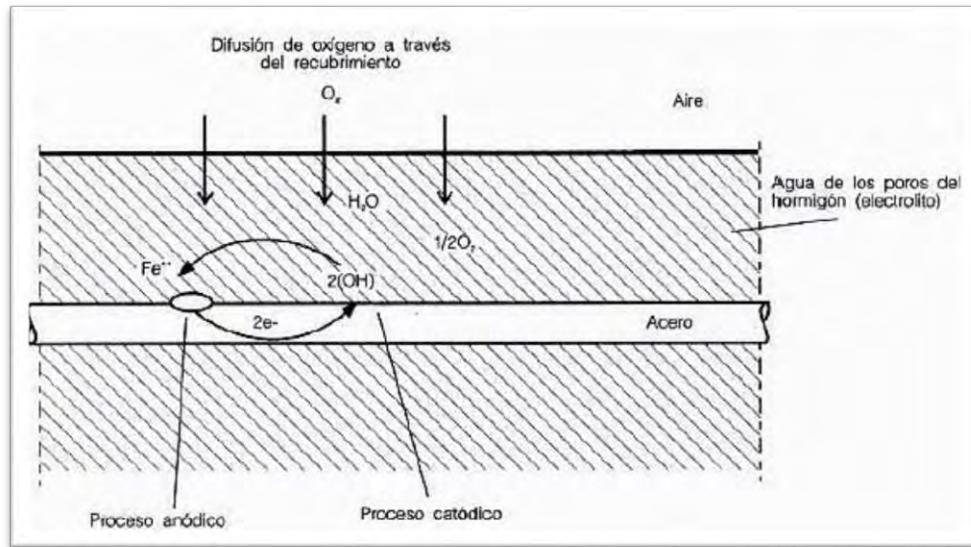


Figura 2.9. Corrosión de las armaduras en el hormigón. Fuente: Bermúdez, M. (2007).

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos más recurrentes: (Cerna, 2010).

- Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material acídico (Figura 2.10).
- Acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno.

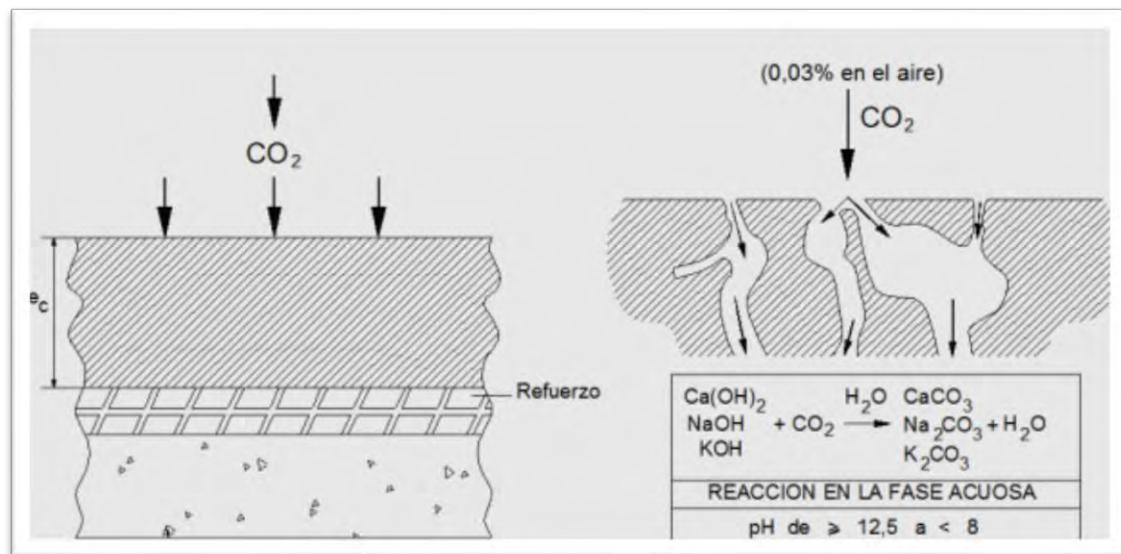


Figura 2.10. Mecanismo de corrosión por efecto de carbonatación. Fuente: Cerna, M. (2010).

Como se señaló anteriormente, en el proceso de corrosión de las armaduras ocurren dos reacciones (Figura 2.11). Estas son:

- Reacción Anódica o de oxidación, correspondiente a la oxidación del hierro para formar iones ferrosos.



- Reacción Catódica o de reducción, correspondiente a la reducción del oxígeno para formar iones hidróxilo OH^- .

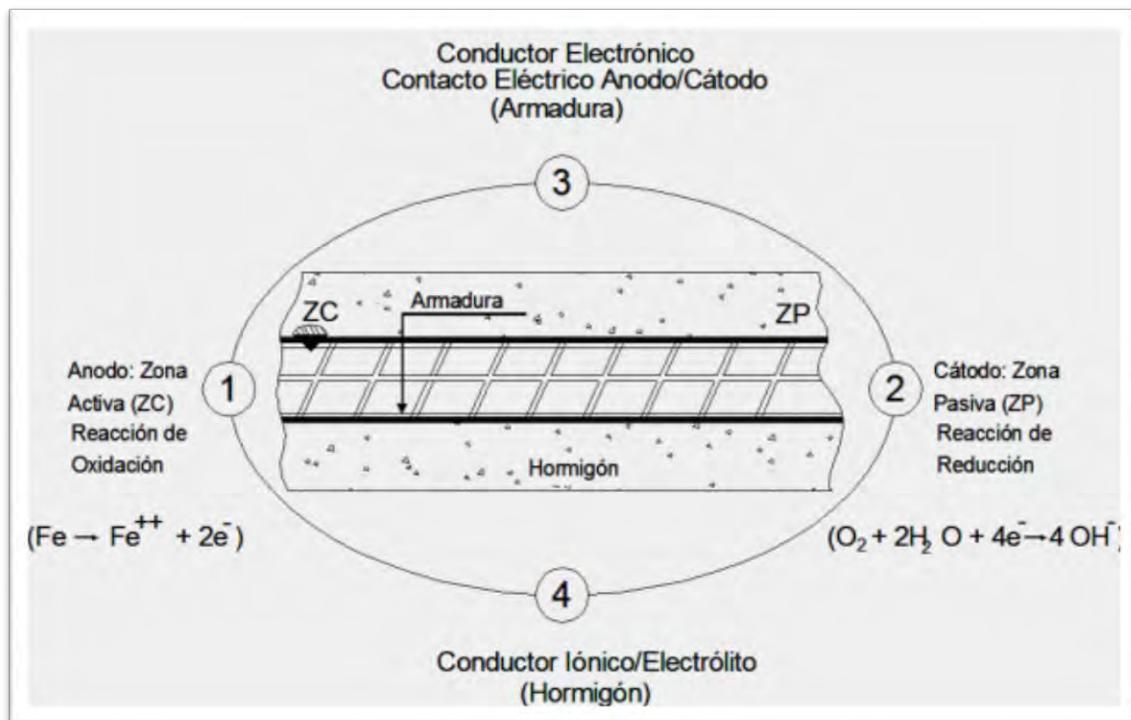


Figura 2.11. Representación electroquímica del acero y el concreto. Fuente: Cerna, M. (2010).

Durante este proceso y en presencia de oxígeno suficiente, se forma óxido expansivo. Inicialmente se produce hidróxido ferroso de color verdoso, y luego, con un mayor grado de oxidación, óxido ferroso-férrico (de color negro) e hidróxido férrico (rojizo) (Bermúdez, 2007). Estos productos de reacción poseen un mayor volumen específico (Figura 2.12), produciendo fisuración y daño en el hormigón adyacente.

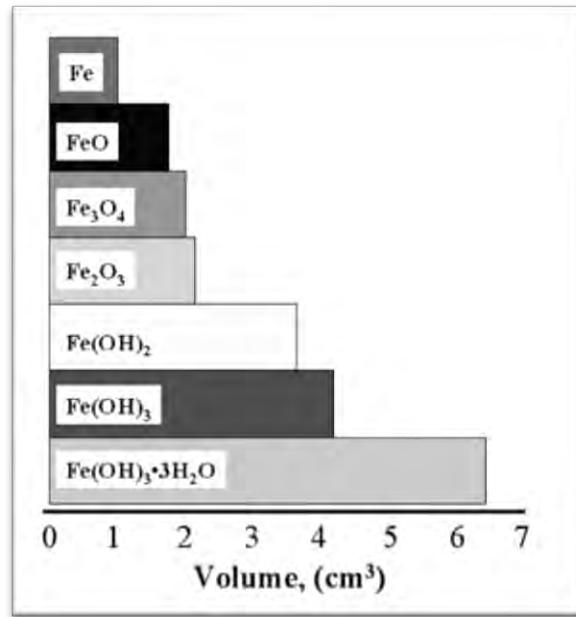


Figura 2.12. Los volúmenes relativos de hierro y su producto de reacción. Fuente: ACI. Comité 222R. (2001).

En un medio acido, en vez del oxígeno disuelto son los iones de hidrogeno los que reaccionan con los electrones liberados (semicelda catódica). (Molina, 2009).



La pasta de cemento portland en el hormigón armado debe poseer un pH mínimo de 12,5 para que no se produzca corrosión en la armadura. Los pH inferiores, como los producidos debido a la carbonatación del hormigón (pH entre 8 y 9), pueden generar corrosión. (ACI. Comité 201.2R, 2001).

2.2.4.1 Inicio de la corrosión activa

Para que se inicie la corrosión activa debe ocurrir que:

- El acero de refuerzo pierda su condición de pasividad debido a:
 - Una cantidad critica de cloruros alcanzando el acero de refuerzo.
 - El frente de carbonatación alcanzando las barras.

- b) Exista suficiente humedad disponible.
- c) Haya disponibilidad de oxígeno.

2.2.4.2 Modelo de Tuutti

Se identifican dos fases en el proceso de corrosión de las armaduras del hormigón, la primera correspondiente a un periodo de iniciación y la segunda a un periodo de propagación. El modelo de Tuutti 1982 (Figura 2.13) describe de forma gráfica ambos procesos.

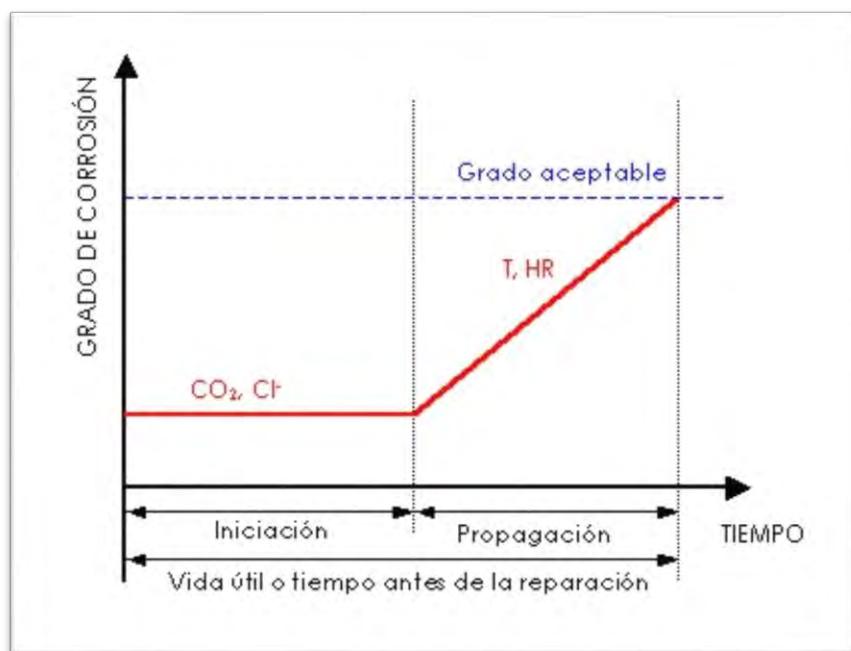


Figura 2.13. Modelo de vida útil de Tuutti. Fuente: D'Andréa, R. (2010).

Durante la fase de iniciación, las sustancias agresivas (CO_2 y cloruros) que pueden corroer el acero penetran desde la superficie hacia el seno del hormigón. Esto ocurre de dos formas: (Saura, 2011).

- Por carbonatación: Comenzando en la superficie del hormigón y moviéndose gradualmente hacia zonas interiores, la alcalinidad del hormigón puede ser neutralizada por el dióxido de carbono de la atmósfera, de forma que el pH del líquido de los poros del hormigón disminuye.

- Por iones cloruro: Pueden penetrar en el hormigón y alcanzar la armadura; si su concentración sobre la superficie del acero alcanza un valor crítico, la capa protectora puede ser localmente destruida.

Posteriormente, durante la fase de propagación, se produce la corrosión activa, previa destrucción de la capa protectora. Si el ataque es por carbonatación la corrosión es generalizada y si es por cloruros es localizada. Finaliza en un máximo aceptable de corrosión, con consecuencias graves para la vida útil de hormigón armado.

2.2.4.3 Cinética de la corrosión

La velocidad de corrosión se puede determinar como una corriente de corrosión, midiendo la velocidad a la que los electrones son arrancados del hierro en las reacciones anódicas. La corriente de corrosión se puede transformar en velocidad de pérdida de masa de la superficie del acero empleando la ley de Faraday: (ACI. Comité 222R, 2001).

$$M = \frac{ItA_w}{nF} \quad (7)$$

Donde:

- M = Masa de metal disuelta o convertida en óxido (g)
- I = Corriente (A)
- t = Tiempo (s)
- Aw= Peso atómico
- n = Valencia
- F = Constante de Faraday (96.500 culombio/masa equivalente)

La intensidad de la corriente de corrosión (I_{corr}) corresponde a la corriente de disolución del metal (reacción anódica), y con el signo cambiado, igual a la corriente de reducción, I_c (catódica), en las zonas fuente de electrones. (Saura, 2011).

$$I_{corr} = I_{anódica} = -I_{catódica} \quad (8)$$

A su vez,

$$I_{corr} = I_a = i_{anódica} * A_{anódica} = i_a * A_a \quad (9)$$

Donde:

$i_{anódica}$ = densidad de corriente en el ánodo.

$A_{anódica}$ = área anodica.

De forma semejante:

$$I_{corr} = -I_c = i_{cátodo} * A_{cátodo} = -i_c * A_c \quad (10)$$

La velocidad de corrosión del acero normalmente se expresa como la velocidad de penetración de la corrosión generalizada (espesor de la armadura de acero que se convierte en óxido por unidad de tiempo) y se mide en $\mu\text{m/año}$. Con frecuencia, especialmente en ensayos de laboratorio, se expresa en unidades electroquímicas, como mA/m^2 ó $\mu\text{A/cm}^2$. En el caso de acero, 1 mA/m^2 ó $\mu\text{A/cm}^2$ se corresponde con una pérdida de masa de aproximadamente $90 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$ y una velocidad de penetración de aproximadamente $11,7 \mu\text{m/año}$. (Saura, 2011).

La velocidad de corrosión se puede considerar despreciable si está por debajo de $0,1 \mu\text{A/cm}^2$, baja entre $0,1$ y $0,2 \mu\text{A/cm}^2$, moderada entre $0,2$ y $0,5 \mu\text{A/cm}^2$, intermedia entre $0,5$ y $1 \mu\text{A/cm}^2$, alta entre 1 y $10 \mu\text{A/cm}^2$ y muy alta por encima de $10 \mu\text{A/cm}^2$. (Saura, 2011).

Estos valores varían según los distintos autores, algunos de estos son (Figura 2.14):

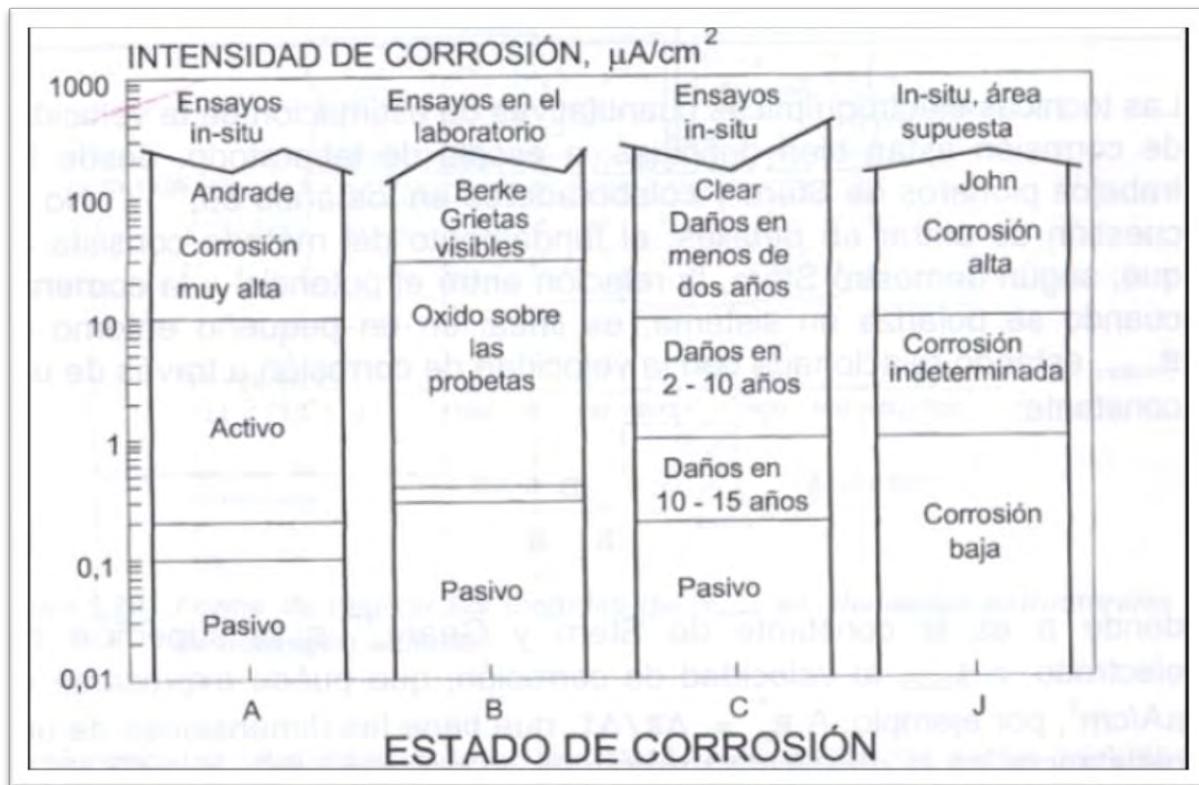


Figura 2.14. Relación de riesgos asociados a niveles de velocidad de corrosión según distintos autores. Fuente: Pérez, L. (2010).

2.2.5 Tipos de corrosión de las armaduras

Dependiendo de factores como la ubicación de las zonas anódicas y catódicas, y la existencia de tensiones, se producen distintos tipos de corrosión en las armaduras del hormigón. A esta clasificación se le llama corrosión según la forma (Figura 2.15).

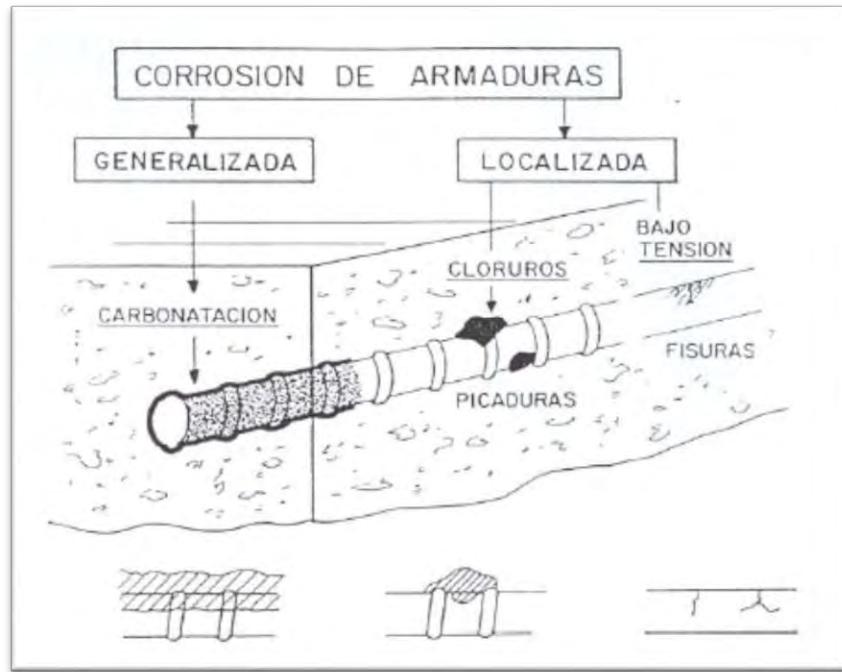


Figura 2.15. Tipos de corrosión de armaduras en el hormigón. Fuente: Bermúdez, M. (2007).

2.2.5.1 Corrosión generalizada

En la corrosión generalizada el ataque se extiende de forma homogénea sobre toda la superficie, generándose una penetración media igual en todos los puntos. Corresponde a la forma más benigna de corrosión, ya que permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales corroídos.

2.2.5.2 Corrosión localizada

La corrosión localizada corresponde a uno de los tipos de corrosión más severos y con los efectos en las estructuras más temidos. Un ataque localizado ocurre producto de diferencias en la composición del medio en una determinada zona o una diferente composición metálica localizada (Carranza et al., 2009). Esto se evidencia en el caso de la penetración de cloruros desde una fuente exterior al hormigón armado, que al destruir la capa de pasivación que protege al acero da lugar a una corrosión de este tipo.

La corrosión localizada puede ocurrir en placas, por picado, intergranular y fisurante.

- Corrosión en placas: El ataque se extiende más en algunas zonas específicas, sin embargo se considera aún un ataque general. En este tipo de corrosión se incluyen los casos intermedios entre corrosión generalizada y corrosión localizada.
- Corrosión por picado: Tipo de corrosión netamente localizada. El ataque se produce en puntos aislados de la superficie y se propaga hacia el interior en forma de canales. En este proceso se puede incluso perforar el metal, producto la ruptura local de la película de óxido que lo cubre.
- Corrosión intergranular: Este ataque presenta como una zona muy estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano. Este tipo de ataque se extiende hasta inutilizar el material por completo, desintegrando totalmente una pieza metálica. (Carranza et al., 2009).
- Corrosión fisurante: También conocida como corrosión bajo tensión. Ocurre cuando además del proceso de corrosión existe una tensión mecánica, formándose fisuras que se propagan rápidamente hacia el interior del metal. Esto ocurre preferencialmente en concreto pre o postensado.

2.2.5.3 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. Como ambos metales tendrán diferentes potenciales de electrodo, el metal que tiene menor potencial de reducción (el metal menos noble) se corroerá más rápidamente, disminuyendo y protegiendo al otro metal de la corrosión.

En el hormigón armado, este tipo de corrosión se presenta cuando el refuerzo se encuentra en contacto con otros conductores más nobles o cuando debido al ingreso de cloruros, armaduras exteriores se corroen mientras las interiores permanecen pasivas (Cerna, 2010).

2.3 ATAQUE POR CLORUROS EN EL ACERO DE REFUERZO

2.3.1 Acción de los cloruros

Los iones cloruros, provenientes de diversas fuentes externas e internas, son capaces de ingresar en el hormigón, a través de la estructura de poros y ser transportados hacia la armadura. De esta forma, penetran por picadura en los puntos débiles, destruyendo localmente la capa pasiva del acero, formando diminutos ánodos de metal activo rodeados por áreas catódicas de metal pasivo (Figura 2.16).

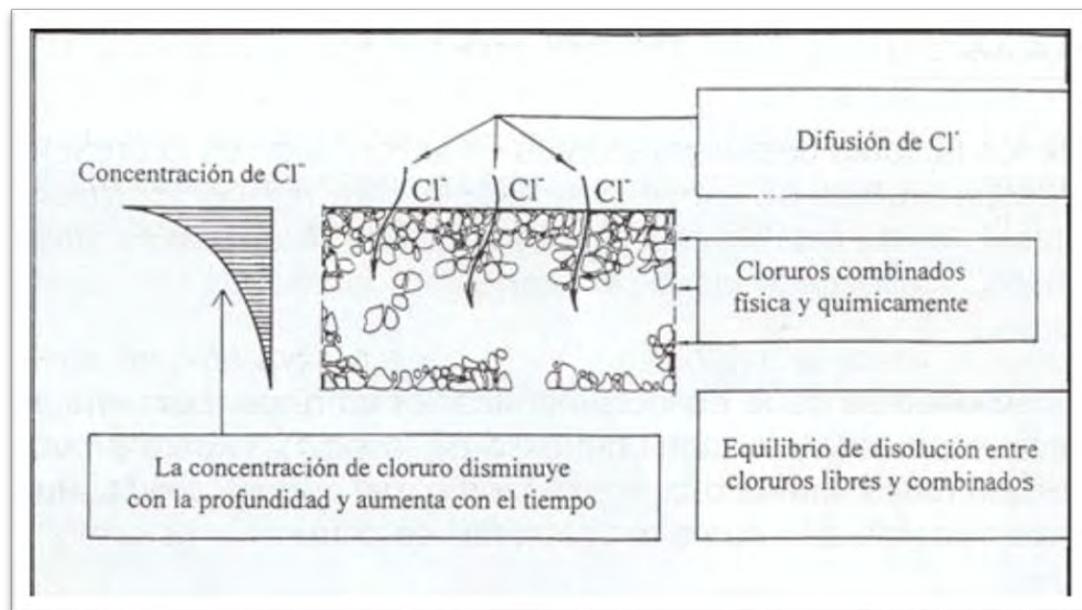


Figura 2.16. Esquema del fenómeno electroquímico de la corrosión por Cl^- . Fuente: Pérez, L. (2010).

Un punto débil se puede generar debido a una caída local del pH, a un hueco de aire por mala compactación, a una fisura del hormigón o a un defecto de la superficie del acero. La formación de anodos locales en los puntos débiles crea diferencias de potencial que atraen cloruros. Al eliminar el oxígeno en el comienzo de la picadura, la superficie de acero situada bajo los productos sólidos de la corrosión se acidifica. (Bermudez, 2007).

Los iones cloruro forman complejos solubles con los iones hierro, lo que favorece la disolución del óxido de hierro, aumentando la solubilidad de la capa pasiva (Figura 2.17).

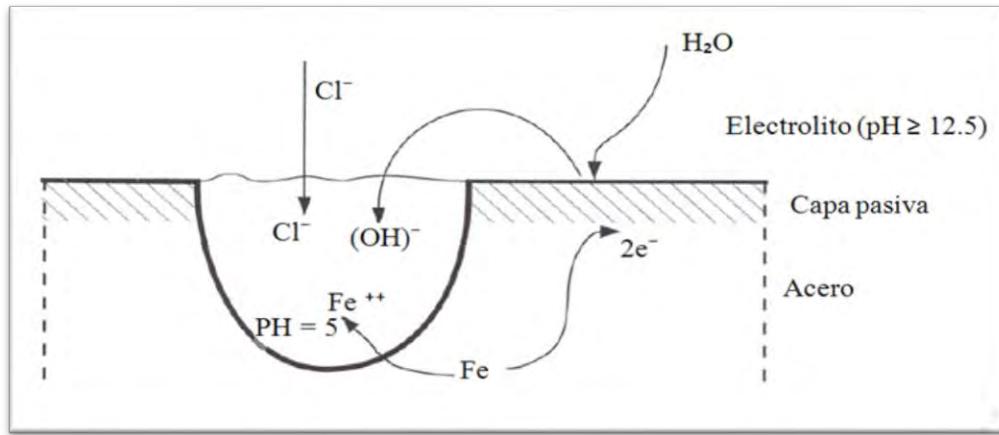


Figura 2.17. Corrosion por picadura a causa de cloruros. Fuente: Bermudez, M. (2007)

En general, la despasivación del acero a causa de la presencia de iones de cloruros depende de dos parámetros (Pérez, 2010):

- Coeficiente de difusión del hormigón, el cual varía en función del tamaño y distribución de los poros del hormigón.
- La capacidad del hormigón para fijar o combinar cloruros.

2.3.2 Tipos de cloruros dentro del hormigón

Los cloruros dentro del hormigón pueden encontrarse en varios estados (Pérez, 2010):

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

Una parte de los cloruros presentes en el hormigón puede estar químicamente ligado con el cemento para formar la llamada Sal de Friedel. Los iones de cloruro en forma libre son los únicos que representan un peligro para la corrosión de armaduras.

2.3.3 Procedencia de los cloruros

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas:

- Porque estén contenidos en las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos). Fuentes internas.
- Porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo. Fuentes externas.

2.3.3.1 Fuentes internas y su normativa

Las fuentes de cloruros locales comprenden el contenido de cloruro de los aditivos, los agregados y los materiales cementicios. La distribución heterogénea de los mismos facilita los fenómenos corrosivos, al igual que el contenido de oxígeno y humedad. Además, algunos cloruros locales pueden ser fijados químicamente mediante reacciones con los componentes del cemento portland que contienen aluminato de calcio, formando cloraluminatos de calcio hidratados (o cloruro), y una vez fijados se pueden liberar debido a la carbonatación (ACI. Comité 201.2R, 2001).

La norma Chilena NCh163. (1979) “Áridos para morteros y hormigones – requisitos generales” establece que para determinar el contenido máximo de cloruros, se debe considerar el aporte proporcional de cloruro de los agregados y componentes del hormigón en 1 m³ de hormigón elaborado. Además, en el caso que exista riesgo de corrosión de las armaduras, señala que se deben incluir especificaciones técnicas referentes a las precauciones necesarias para su protección.

La norma Chilena NCh 170. (1985) “hormigón: requisitos generales” en su anexo G, establece el contenido máximo de ion Cl⁻ soluble en agua presente en el hormigón, a la edad de 28 días, proveniente del agua, los áridos, del cemento o de los aditivos (Tabla 2.2).

Tipo de elemento	Contenido máx. de Cl ⁻ soluble en agua en el hormigón (kg Cl ⁻ / m ³)
Hormigón pretensado	0,25
Hormigón armado	1,20

Tabla 2.2. Cantidad máxima de Cl⁻ como protección contra la corrosión. Fuente: NCh 170. (1985).

2.3.3.2 Fuentes externas

Cuando los cloruros penetran desde el exterior, se deben tener en cuenta los siguientes factores: (Cerna, 2010).

- Tiempo que tardan en llegar hasta la armadura.
- La proporción que induce la despasivación.
- La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

En relación al tiempo, es necesario averiguar la profundidad que han penetrado los cloruros y analizar si son capaces de alcanzar durante su vida útil una profundidad equivalente al recubrimiento.

2.3.4 Penetración de los cloruros

Los cloruros pueden penetrar en el hormigón según los siguientes mecanismos: Permeabilidad, capilaridad, absorción y difusión.

La permeabilidad y la absorción en el hormigón armado son mecanismos rápidos de transporte, a diferencia de la difusión que es mucho más lenta. El mecanismo de penetración de los cloruros en la estructura tiene relación con las condiciones de exposición y la estructura de poros de la misma.

En los primeros centímetros del recubrimiento del hormigón la corrosión depende de la succión capilar, pero la penetración a profundidades mayores está gobernada por la difusión a largo plazo. (Bermudez, 2007).

2.3.4.1 Contenido crítico de cloruros

El valor umbral de concentración de cloruro por debajo del cual la corrosión significativa no se produce es dependiente de varios parámetros como los contenidos de (C₃A) y (C₄AF), pH, relación a/c y si el cloruro se

añadió a la mezcla o penetró en el hormigón endurecido. Sin embargo, estos factores a veces trabajan en oposición. Por ejemplo, cuanto mayor fuere el pH, mayor será la cantidad de cloruros que el acero puede tolerar sin picaduras, pero la cantidad de cloruros presente en solución para un contenido total de cloruro dado también aumentará con el pH. (ACI. Comité 222R, 2001).

Algunos de estos parámetros que intervienen en el contenido crítico de cloruro y la relación entre los efectos de la humedad relativa y la calidad del recubrimiento de hormigón sobre el umbral de cloruro se presentan en la Figura 2.18.

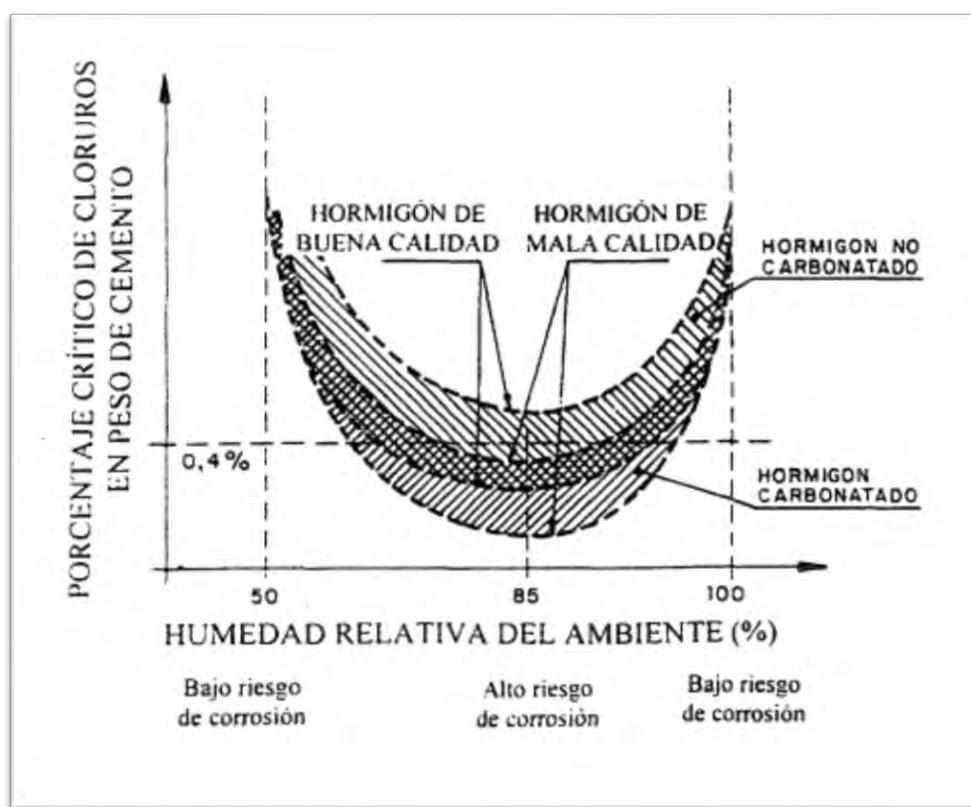


Figura 2.18 Contenido crítico de cloruros en función de la humedad ambiente, la calidad del hormigón y su posible carbonatación. Fuente: Schiessl, P. (1984).

2.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

2.4.1 Recubrimiento

La corrosión del acero del hormigón armado depende directamente del espesor y calidad de su recubrimiento. En muchos casos la masa de concreto de recubrimiento suele ser menos compacta y más porosa que el resto del concreto de la estructura, afectando en la vida útil de ésta (Figura 2.19).



Figura 2.19. El recubrimiento como factor determinante de la corrosión. Fuente: Torrent, R. (2011).

Una forma de evitar los recubrimientos de mala calidad es controlando los procesos de colocación, vibrado y curado del hormigón, previniendo la formación de microfisuras, que posteriormente dan lugar a problemas de corrosión.

2.4.2 Espesor de recubrimiento

Aumentar el espesor de recubrimiento permite obtener una mejor calidad del mismo debido a los procesos propios del hormigonado. Un recubrimiento de mayor espesor, da lugar a uno de mejor calidad y por tanto una mayor protección al acero de refuerzo. Por ejemplo, el tiempo necesario para que los iones cloruro alcancen una barra de acero a 5cm (2 pulgadas) de la superficie es 4 veces el tiempo necesario para un recubrimiento de 2,54 cm (1 pulgada) (NRMCA, 2005).

Los manuales disponibles en relación a los recubrimientos recomiendan (NRMCA, 2005):

- El ACI 318 recomienda un mínimo de $1\frac{1}{2}$ pulgadas (aprox. 4 cm) de recubrimiento para la mayoría de las estructuras y lo incrementa a 2 pulgadas (aprox. 5 cm) de recubrimiento para la protección contra sales de deshielo.
- El ACI 357 recomienda $2\frac{1}{2}$ pulgadas (aprox. 6 cm) de recubrimiento mínimo en ambientes marinos. Si se utilizan agregados más grandes, se requiere un mayor recubrimiento. Para agregados mayores de $\frac{3}{4}$ pulgadas (20 mm), una regla sencilla es añadirle al tamaño máximo nominal del agregado, la magnitud de $\frac{3}{4}$ pulgadas adicionales de recubrimiento para la exposición a sales de deshielo, o de $1\frac{1}{4}$ pulg. (45 mm) de recubrimiento para la exposición a ambiente marino. Por ejemplo un concreto con tamaño de agregado de 1" en exposición marina deberá tener un recubrimiento mínimo de $2\frac{3}{4}$ ".

2.4.3 Curado del hormigón

Con el curado con agua se trata de compensar la pérdida de agua por evaporación mediante la aportación de agua externa o bien en impedir dicha evaporación mediante la creación de barreras impermeables. En el curado con agua, el suministro de ésta debe ser continuo debido a que si se realiza de forma intermitente, el curado suele ser poco eficaz. (IECA, 2013).

Se necesita un curado húmedo mínimo de 7 días a 21°C para el concreto con relación A/C de 0.4, mientras que serían necesarios 6 meses para uno de relación A/C de 0.6 para obtener un desempeño equivalente. Numerosos estudios muestran que la porosidad del concreto se reduce significativamente con el incremento del tiempo de curado y por ende se mejora la resistencia a la corrosión. (NRMCA, 2005).

2.4.4 Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es muy utilizada para realizar el control de calidad de hormigones y determinar si son aptos para su utilización en distintos medios agresivos.

En el diseño del concreto y en el control de calidad, la resistencia es la propiedad que mayormente se especifica, producto de su fácil obtención experimental. Además, otras propiedades como el módulo de elasticidad, la impermeabilidad, y la resistencia a los agentes ambientales agresivos se desprenden de ella (ACI. Comité 222R, 2001).

El ACI 318, (2008) determina una resistencia especificada a la compresión del concreto mínima (f'_c min) de 35 MPa para hormigones en clase de exposición C2. (ver anexo A).

2.4.5 Relación agua/cemento

La relación agua / cemento (a/c) crece cuando aumenta la cantidad de agua y disminuye al aumentar el contenido de cemento. Mientras más baja es la relación a/c, más favorables son las propiedades del hormigón endurecido, por lo que constituye una importante influencia en su resistencia, retracción y durabilidad; otorgando una mayor resistencia química al hormigón.

El ACI 318. (2008) en su tabla 4.3.1. "Requisitos para el concreto según la clase de exposición" (ver anexo A) establece para la clase de exposición C2 una relación agua/cemento de 0.4.

En general, cuando la relación a/c excede el valor 0.6, la permeabilidad aumenta considerablemente debido al incremento en la porosidad capilar. (Bermudez, 2007).

2.4.6 Cemento

Además del contenido de cemento, el tipo de cemento es determinante para el estudio de la difusión del ion cloruro dentro del hormigón, ya que debido a su composición, algunos son capaces de ligar iones o de aumentar el pH más que otros.

El elevado pH del hormigón se debe principalmente a la presencia de hidróxido de calcio, el cual se libera cuando se hidrata el cemento pórtland. El pH de una solución saturada de hidróxido de calcio es de 12,5; este valor es el pH mínimo de una pasta no carbonatada. Es posible que debido a la presencia de hidróxido de sodio y potasio el pH sea más elevado, por lo que cementos que los contengan en mayor cantidad, presentan un mejor comportamiento a la carbonatación (ACI. Comité 201.2R, 2001).

El componente del cemento capaz de fijar iones cloruro es el aluminato tricálcico (C_3A), haciendo disminuir el contenido de iones libres, debido a la formación de la llamada sal de Friedel. De igual manera, en cementos con adiciones más activas como las escorias de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volcánicas o mezclas de ellas, la penetración por difusión, es al menos diez veces inferior que la penetración en cementos sin adiciones (Pérez, 2010).

Hormigones con mayor contenido de C_3A se comportan mejor en ambientes marinos. Estudios demuestran que en los casos en los cuales se utilizó un cemento con un contenido de aluminato tricálcico (C_3A) de entre 5 y 8%, la fisuración debida a la corrosión del acero fue menor que cuando se empleó un cemento con un contenido de C_3A menor que 5% (ACI. Comité 201.2R, 2001).

2.4.7 Tamaño máximo de árido

Algunos tipos de agregados tienen un coeficiente de permeabilidad superior que la pasta de cemento hidratada. Esta comparación sorprende por cuanto la porosidad de las rocas suele ser bastante inferior que la de pastas de cemento hidratadas y la razón se explicaría mediante consideraciones relativas a la conectividad de su estructura de poros (Fernández, 2012).

La cantidad y tipo de agregado condicionan la figuración producida por contracción en el proceso de secado del hormigón. Un hormigón con mayor cantidad de agregado tendrá una menor contracción por secado y mientras más rígido sea este, se comportará mejor durante el mismo fenómeno (Vidaud, 2013).

El incremento en el tamaño máximo del agregado también provoca incremento en la permeabilidad, dado que se magnifica la incompatibilidad mecánica y reológica con la pasta (Figura 2.20) (Fernández, 2012).

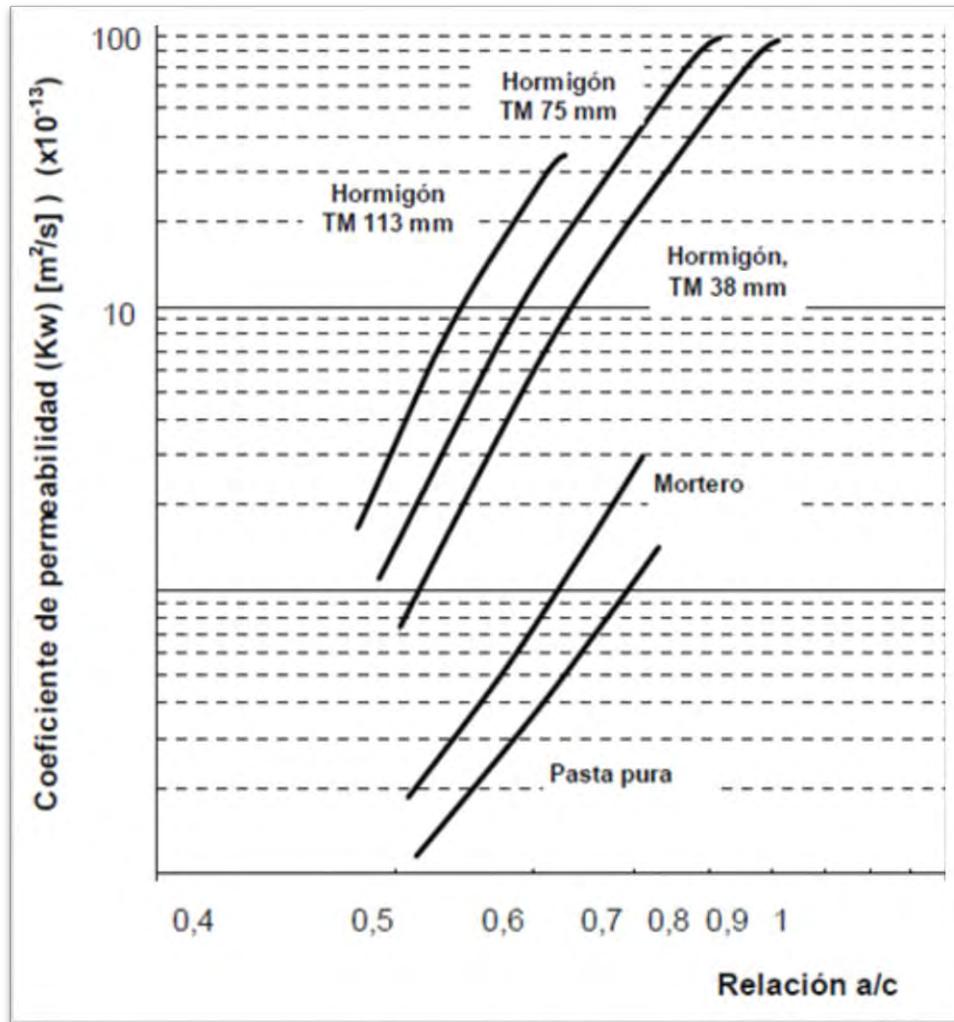


Figura 2.20. Permeabilidad v/s relación agua/cemento, para hormigones con distintos tamaños máximos de áridos. Fuente: Fernández, L. (2012).

2.4.8 Inhibidores de corrosión

En el estudio de la corrosión, un inhibidor corresponde a un agente que protege al hormigón armado, sin disminuir la concentración del agente corrosivo. Ellos pueden trabajar ya sea como inhibidores anódicos o catódicos, como ambos, o como eliminadores de oxígeno. Una reducción significativa en la tasa de reacciones anódicas o catódicas dará lugar a una reducción significativa en la velocidad de corrosión y un aumento en el nivel de umbral de la corrosión inducida por cloruro. El nitrito de calcio es el inhibidor de corrosión inorgánico más ampliamente utilizado en el hormigón, y tiene la ventaja de no tener los efectos secundarios que otros poseen (ACI. Comité 222R, 2001).

2.4.9 Estado superficial del acero.

El comportamiento del acero de refuerzo, se puede ver influenciado su el estado superficial inicial. Si el acero se encuentra recubierto de óxidos de color pardo, su pasivación será más difícil e incompleta y la cantidad de agresivo necesario sacarlo de este estado será mucho menos que si su superficie se coloca limpia de óxidos y otras suciedades (Bermudez, 2007).

La superficie de acero preoxidadada puede crear condiciones tales que la solución alcalina del hormigón no es capaz de cambiar suficientemente el electrolito que hay bajo el óxido como para pasivar el metal. En los casos en los que se producen ciclos de humedad y secado, la capa de óxido podría actuar como un “acumulador” de los componentes reducibles del sistema: Cuando hay poca humedad y por lo tanto un acceso fácil del oxígeno, los productos de la corrosión se oxidan; cuando hay mucha humedad y por lo tanto dificultad de acceso del oxígeno, el óxido se reduce y participa en la despolarización (Bermudez, 2007).

Las alternativas disponibles en la actualidad a las barras sin recubrimiento son de acero con recubrimiento epóxico o de acero galvanizado. Acero inoxidable y reemplazos no metálicos para el acero están bajo consideración, pero son caros y por lo general no están disponibles (ACI. Comité 222R, 2001).

2.4.10 Condiciones ambientales

La temperatura juega también un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promociona la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro lado, 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 humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares (Cerna, 2010).

2.4.11 Fisuración del hormigón

El hormigón es un material que, en el caso de no estar fisurado, posee una durabilidad alta ya que la matriz es poco porosa, del orden del 5%, con lo cual la continuidad de los poros es pobre y a los agentes externos les cuesta penetrar. Sin embargo, el hormigón es altamente propenso a la fisuración y por eso se

vuelve permeable durante el servicio. Cuando el hormigón se fisura, éste se convierte en permeable y disminuye radicalmente su protección frente a la corrosión. (Pujadas, 2008).

Los diferentes tipos de fisuras de una estructura tienen relación con su origen y se presentan en la Figura 2.21, donde:

- Asentamiento plástico (A-B-C)
- Retracción plástica (D-E-F)
- Fisuras de origen térmico (G-H)
- Retracción a largo plazo (I)
- Afogarado (J-K)
- Corrosion de armadura (L-M)
- Reacción álcali-árido. (N)

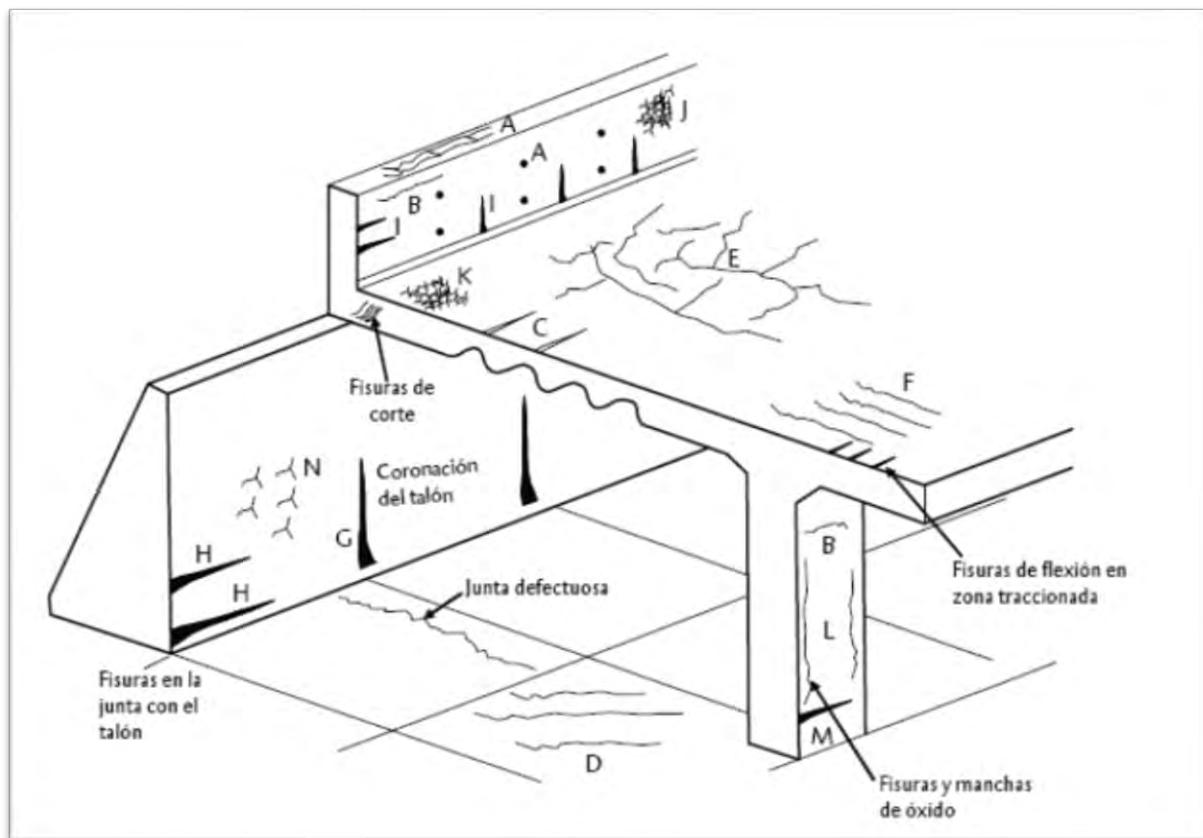


Figura 2.21. Ejemplo de fisuras intrínsecas en una estructura de hormigón hipotética. Fuente: Pujadas, P. (2008).

En general, las fisuras de origen atensional se producen debido al incremento de volumen de las barras producido por su oxidación, que ejerce presión sobre el hormigón hasta estallarlo, provocando fisuras paralelas a las armaduras. Estas fisuras son debidas generalmente a la corrosión inicial directa de las armaduras por escasa protección física de las barras (escasez de recubrimiento, elevada porosidad, etc.), o por escasa protección química (bajo contenido de cemento) (Pujadas, 2008).

Algunos estudios indican que, en un hormigón fisurado, el comienzo de la corrosión depende de la anchura de la fisura y del espesor de recubrimiento, debido a que la corrosión depende de la disponibilidad de oxígeno, pero no en la fisura sino en el hormigón sano situado en el extremo catódico del acero y, por lo tanto, depende de la velocidad de difusión del oxígeno a través del recubrimiento. Después de la despasivación, los anchos de fisura son de menos importancia dado que el proceso catódico es el principal factor determinante de la velocidad de corrosión. A su vez, la profundidad de la fisura tiene una mayor incidencia en el proceso corrosivo de las armaduras (Bermudez, 2007).

2.5 MÉTODOS PARA EVALUAR LA CORROSIÓN DEL HORMIGÓN

Para evaluar la corrosión de las estructuras en ambiente marino se necesitan técnicas de estudio eficaces, que sean capaces de evaluar el estado real de la estructura y poder seleccionar la medida correctiva técnicamente más viable, además de rentable. Al no existir directrices normadas para realizar este análisis, se hace difícil unificar criterios a la hora de tratar una estructura corroída.

El ACI 222R. (2001) presenta un proceso paso a paso para realizar la evaluación y reparación de las estructuras. Esta metodología se ha aplicado con éxito a estructuras de puente y puede ser aplicado a cualquier estructura de hormigón armado en un ambiente corrosivo.

La metodología incluye los siguientes pasos: (ACI. Comité 222R, 2001).

- 1) **Obtener información sobre el estado de la estructura y de su entorno:** consiste en la revisión de planos estructurales, informes de estudios de las condiciones anteriores, y la información disponible sobre las condiciones ambientales en el lugar. La información obtenida debe incluir lo siguiente:
 - Ubicación, tamaño, tipo y edad de la estructura;
 - Cualquier característica de diseño inusual;
 - Las condiciones de exposición del medio ambiente, tales como las variaciones de temperatura, medio ambiente marino y la precipitación;

- Reforzar los detalles de acero;
 - El tipo de refuerzo tales como, galvanizado, acero no pretensada o pretensado de acero recubierto, recubierto de epoxi;
 - Detalles de drenaje, mantenimiento y el historial de reparaciones
 - Presencia de cualquier sistema de protección contra la corrosión.
- 2) **Aplicar el análisis de ingeniería de la información y la definición de un ámbito de trabajo:** Implica el análisis de ingeniería de la información obtenida para desarrollar el ámbito específico del trabajo que se sigue en el tercer paso.
- 3) **Llevar a cabo una evaluación de la condición de la estructura completa:** Realizar una condición de control exhaustivo de la estructura. El estudio implica la realización de pruebas de campo y de laboratorio adecuadas para cuantificar el deterioro de la estructura.
- 4) **Analizar los datos de la evaluación del estado:** Análisis de campo y resultados de pruebas de laboratorio.
- 5) **Desarrollar un modelo de deterioro de la estructura:** Conjunto de relaciones matemáticas entre los datos de condición a la corrosión y la vida útil restante, el futuro estado de la estructura, o daños estimados futuro.
- 6) **Identificar las opciones de rehabilitación que sean viables para esa estructura en particular:** Una serie de opciones para la rehabilitación se definen sobre la base de la viabilidad técnica y la vida útil deseada de la estructura.
- 7) **Realizar análisis de costo del ciclo de vida (ACCV):** Compara y evalúa el coste total de las opciones de rehabilitación para satisfacer funciones idénticas basada en la vida prevista de la estructura rehabilitada. El valor de una opción de rehabilitación particular incluye no sólo su coste inicial, sino también el coste de la utilización de esa opción para el período de tiempo deseado.
- 8) **Definir la alternativa más rentable para la rehabilitación de la estructura.**

2.5.1 Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo

Existen métodos no destructivos para evaluar el estado corrosivo del acero de refuerzo y para determinar qué tan propenso es a corroerse.

El ACI 222R. (2001) señala los procedimientos de estudio que se aplican a las estructuras de hormigón armado con el fin de determinar las causas, la extensión y la magnitud de la corrosión del acero.

Los métodos para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo: (ACI. Comité 222R, 2001).

- La inspección visual.
- Estudio de deslaminación.
- Medición del recubrimiento del hormigón.
- Análisis del contenido de iones cloruro.
- Profundidad de carbonatación de las pruebas.
- Pruebas de conductividad eléctrica.
- Humedad del concreto y las mediciones de resistividad.
- Asignación de un potencial de corrosión.
- Mediciones de la velocidad de corrosión.
- Determinación de la pérdida de sección transversal de acero de refuerzo.

CAPÍTULO 3: PREPARACIÓN EXPERIENCIA DE LABORATORIO

3.1 CONFECCIÓN DE PROBETAS

Se fabricaron tres tipos de probetas, todas con un acero de refuerzo de diámetro 10 mm ($\varnothing = 10 \text{ mm}$) y de 20 cm de largo.

En total se confeccionaron 30 probetas, 10 de cada tipo, cuyas medidas se especifican en la Tabla 3.1 y Tabla 3.1.

PROBETA	Diámetro (cm)	Recubrimiento (cm)
A	5	2
B	7.5	3.25
C	11	5

Tabla 3.1. Tipos de probetas. Fuente: Elaboración propia.

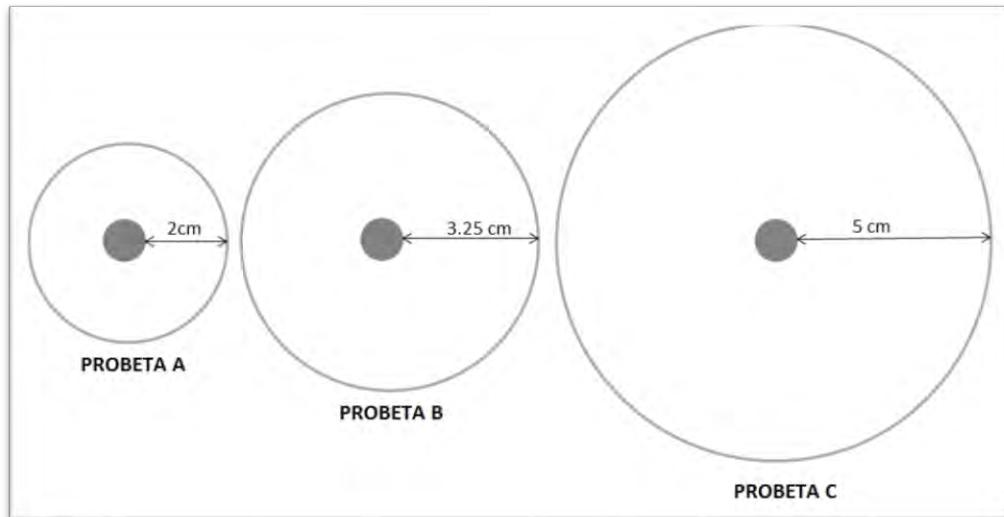


Figura 3.1. Tipos de probetas fabricadas. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Confección de moldajes

Se fabricaron los moldajes para los tres tipos de probetas. A continuación se presentan los materiales y el procedimiento utilizado:

3.1.1.1 Materiales

- Barra de acero A44-28H, $\phi=10$ mm y de largo 10 cm.
- Adhesivo Vinilit, para tuberías y fittings de PVC.
- Barras de madera de $\phi=10$ mm. Y de largo 10 cm.
- Cable de cobre recubierto de $\phi= 2.5$ mm y de largo 30 cm para cada probeta.
- Manguera de gas tipo G-3702, cortada en trozos de 10 cm y 30 cm para cada probeta.
- Tubo de PVC Sanitario de $\phi=110$ mm cortado cada 20 cm.
- Tubo de PVC Sanitario de $\phi=75$ mm cortado cada 20 cm.
- Tubo de PVC Sanitario de $\phi=50$ mm cortado cada 20 cm.
- Tapa gorro PVC de $\phi= 110$ mm.
- Tapa gorro PVC de $\phi=75$ mm.
- Tapa gorro PVC de $\phi= 50$ mm.
- Pintura anticorrosiva Gris TRICOLOR
- Tapagoteras.

3.1.1.2 Procedimiento

- 1) Perforar la tabla de madera con agujeros de $\Phi =10$ mm debidamente espaciados, con el fin de fijar los moldajes de PVC y así facilitar el proceso de hormigonado (Figura 3.2.I).
- 2) Dimensionar los materiales con los largos estipulados (Figura 3.2.II).
- 3) Perforar las barras de acero en la cara transversal de uno de sus extremos. La perforación debe ser de 2 cm. de profundidad y $\Phi= 3$ mm. Pintar los extremos de cada barra en 2 cm con pintura anticorrosiva.
- 4) Retirar 2 cm de recubrimiento plástico de ambos extremos de los trozos de alambre de cobre. Introducir cada alambre de cobre sobre el agujero de cada barra de acero. Posteriormente introducir a presión la

manguera de gas 2 cm sobre los extremos de la barra de acero, la de 30 cm. en su extremo superior y la de 10 cm en su extremo inferior.

- 5) Insertar a presión el trozo de madera de 10 cm. en la sección manguera de gas de 10 cm, hasta que quede en contacto con la barra de acero.
- 6) Perforar los tapa gorros de PVC con orificio de $\Phi = 15$ mm en su centro, para introducir el conjunto anteriormente armado de la barra de acero. Dejar sobresalir del orificio de la tapa gorro 2 cm de la barra de madera.
- 7) Fijar en la tabla de madera el conjunto de la barra de acero, mangueras y tapa gorro introduciendo los 2 cm de la barra de madera en la tabla perforada. Sellar con silicona de modo de adherir el moldaje de PVC (Figura 3.2.III).
- 8) Lijar en su extremo inferior cada tuvo de PVC de 20 cm y unir cada uno de ellos con su respectivo tapa gorro usando adhesivo Vinilite (Figura 3.2.IV).
- 9) Fijar la manguera de gas superior al costado de las probetas con alambre, con el fin de que no se mueva al momento del hormigonado (Figura 3.2.V).

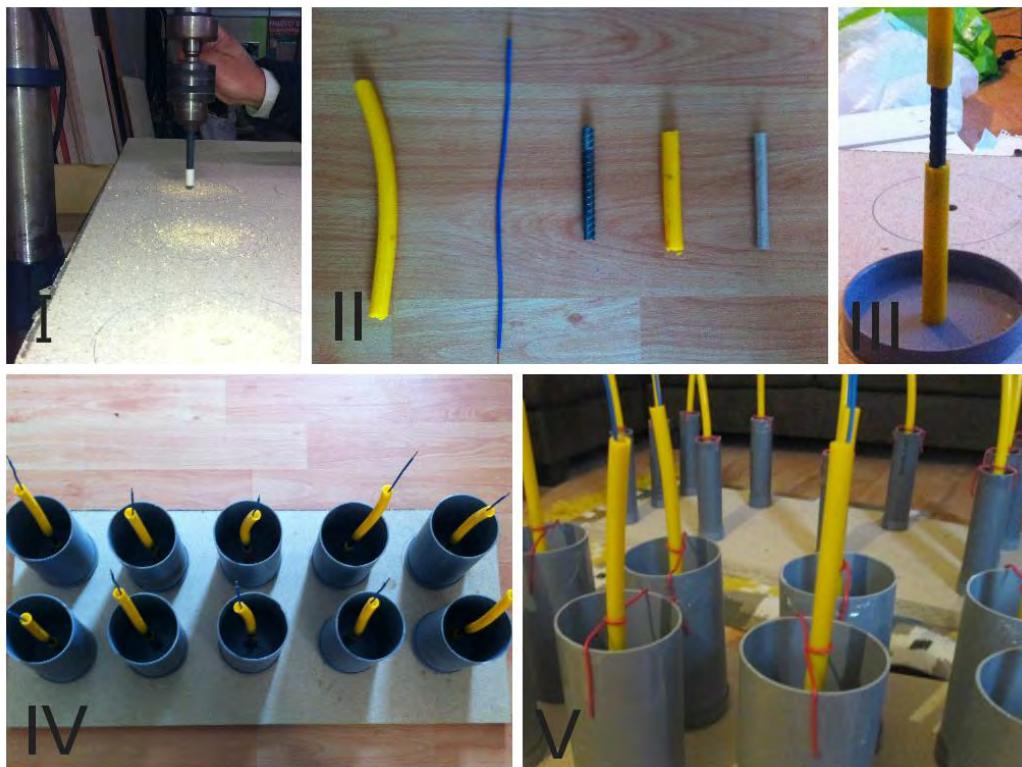


Figura 3.2. Confección de moldajes. Fuente: Elaboración propia.

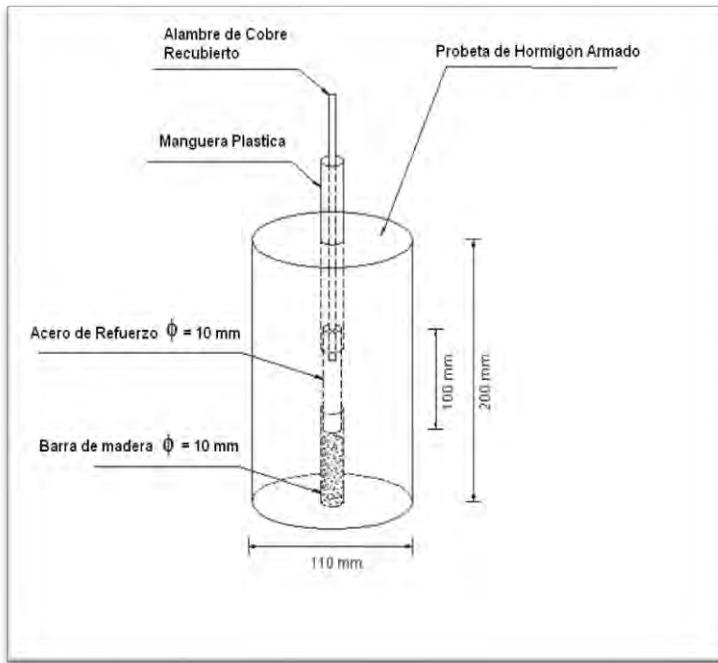


Figura 3.3. Modelo esquemático del moldaje de la probeta “C”. Fuente: Flores, M. (2012).

3.1.2 Muestras de hormigón

El hormigón fue proporcionado por la empresa Ready Mix planta Valdivia, empresa dedicada a la producción y venta de hormigones premezclados para obras civiles.

El hormigón utilizado corresponde a un R7 H30 (90)20-06-32-07-N, esto significa:

- **H30:** Hormigón con una resistencia especificada a la compresión (f'_c) de 300 Kgf/cm², medida en probetas cúbicas de 200 mm de arista, disminuyendo a 250 Kgf/cm² si es medida en probetas cilíndricas. Al ser del tipo R7, esta resistencia se alcanza a los 7 días.
- Si bien la normativa establece para ambientes agresivos una resistencia a la compresión mínima de 350 kgf/cm², se utilizó un hormigón H30 debido a su disponibilidad. Sin embargo, es importante mencionar, que en los últimos ensayos de compresión en probetas cúbicas realizados por la planta a sus hormigones con estas características, se alcanza en promedio una resistencia de 347 kgf/cm² a los 7 días.
- **90:** Nivel de confianza de un 90%.

- **20:** Tamaño máximo de árido de 20mm, con el fin de alcanzar la resistencia y facilitar el hormigonado de las probetas A y B, producto de su bajo recubrimiento.
- **06:** Asentamiento del cono de Abram de 6cm
- **32:** Código que establece que se trata de un hormigón de alta resistencia
- **07:** Hormigón R7, diseñado para alcanzar una determinada resistencia en tiempos menores a 28 días, sin la utilización de aditivos aceleradores de fraguado.
- Este tipo de hormigón tiene la ventaja de permitir tiempos de colocación y trabajo más prolongados, con resultados de terminación óptimos, facilitando el hormigonado de las probetas de menor diámetro.
- **N:** Hormigón normal.

3.1.2.1 Características de los componentes del hormigón

- **Árido.** Arena y gravilla de planta de Áridos Chumpullo, Valdivia.
- **Cemento.** Cemento Bio Bio especial. Cemento obtenido por molienda conjunta de clínker, puzolana y yeso. Otorga mayor durabilidad, impermeabilidad y trabajabilidad del hormigón.
- **Aditivo.** No se considera el uso de aditivos aceleradores de fraguado, de manera de permitir tiempos de colocación y trabajo más prolongados, con terminaciones óptimas.
- **Relación agua – cemento.** Se utilizó una relación agua - cemento de 0,42. Cantidad cercana al valor establecido por normativa (0,4), evitando que se produzcan una mayor cantidad de poros por donde puedan penetrar los agentes agresivos.

3.1.2.2 Proceso de hormigonado

El hormigonado se realizó en terreno, utilizando como referencia la norma chilena NCh1017.E OF75 “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción”.

Esta norma establece un procedimiento de compactación de probetas según el asentamiento de cono de abrams. Así, para un asentamiento (A) entre 5 y 10 cm, se permite el uso de vibrado o apisonado.

Debido a los diámetros reducidos de las probetas, se realizó el hormigonado por medio de apisonado de la siguiente forma (Figura 3.4):

- a) Se realiza el hormigonado en 3 capas de igual espesor, se apisona con una varilla a razón de 8 golpes por cada 100 cm² de superficie.
- b) La capa inferior se apisona en toda su altura, sin golpear el fondo, las capas superiores se apisonan de modo que la varilla-pisón penetra aproximadamente 2 cm en la capa subyacente.
- c) Después de apisonar se golpea suavemente los costados de los moldes para evitar vacíos. (NCh1017, 1975).



Figura 3.4. Proceso de compactación de probetas. Fuente: Imágenes google SF.



Figura 3.5. Probetas hormigonadas. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.3 Curado y desmolde

Luego del proceso de hormigonado se cubren las probetas con un plástico, con el fin de evitar la evaporación, intentando mantener la temperatura ambiente entre 16° y 27°.

Transcurridas 24 horas se realizó el proceso de desmolde, tiempo recomendado según NCh1017. (1975), siempre que las condiciones de endurecimiento permitan un desmolde sin causar daño a la probeta.

Posteriormente se realizó el curado de las probetas desmoladas bajo agua, durante los próximos 6 días.

3.2 PREPARACIÓN DE EXPERIENCIA

3.2.1 Preparación de solución salina

La solución de cloruro de sodio se preparó en el laboratorio de química general, con un 3,5 % P/V (3.5 gr de NaCl para 100 ml de solución), utilizando agua destilada (Figura 3.6).



Figura 3.6. Preparación solución salina. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Tiempos de exposición

Se definieron 8 tiempos de exposición, los cuales en un inicio tendrían 7 días de diferencia, pero luego de un mes se decidió aumentar este tiempo a 10 días, con el fin de obtener resultados más representativos de la corrosión del acero y el hormigón (Tabla 3.2).

Tiempo de exposición	Días
T0	0
T1	7
T2	14
T3	21
T4	28
T5	38
T6	48
T7	58
T8	68

Tabla 3.2. Tiempos de exposición. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: EXPERIENCIA DE LABORATORIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de analizar el proceso corrosivo del hormigón armado, y específicamente del acero de refuerzo, se desarrollaron distintas técnicas de detección de la corrosión en las probetas.

En el proceso de elaboración de las probetas, específicamente en el hormigonado y desmolde, se pueden producir leves imperfecciones superficiales, que en las probetas de menor diámetro (A y B) pueden constituir un factor determinante en el proceso corrosivo. Es por esta razón que antes de sumergir las probetas en la solución de NaCl se realizó una inspección visual de cada una, describiendo las imperfecciones que presentaban y clasificándolas según su estado en regular, buena y muy buena (Tabla 4.1). Las probetas en mejores condiciones se situaron en los tiempos 4 y 8, mientras que las probetas en peores condiciones se dejaron como probetas extra y emergencia, las cuales serían utilizadas sólo en caso de que se necesite mayor tiempo de exposición para obtener algún resultado.

Probeta	Diámetro (mm)	Valoración	Probeta	Diámetro (mm)	Valoración
A1	50	regular	B1	75	buena
A2	50	buena	B2	75	buena
A3	50	buena	B3	75	muy buena
A4	50	muy buena	B4	75	muy buena
A5	50	regular	B5	75	buena
A6	50	buena	B6	75	muy buena
A7	50	buena	B7	75	buena
A8	50	muy buena	B8	75	muy buena
A extra	50	regular	B extra	75	regular
A emergencia	50	regular	B emergencia	75	regular
		C (todas)		110	muy buena

Tabla 4.1. Valoración estado superficial de probetas. Fuente: Elaboración propia.

Estableciendo una probeta de cada tipo (A, B y C) para cada tiempo de exposición, se procedió a sumergir las probetas en la solución de NaCl, ubicando cada trío en un recipiente o cubeta distinto.

4.2 MEDIDA DE POTENCIAL ELECTRICO

La medida del potencial electroquímico indica la facilidad de transferencia de electrones entre el acero de refuerzo y el medio en que se encuentra. Corresponde a una propiedad de la interface acero/hormigón y para poder medir la diferencia de potencial que se produce entre el acero y el medio es necesario utilizar un electrodo de referencia.

Los valores obtenidos se ven influenciados por el recubrimiento de hormigón, el contenido de humedad y el oxígeno presente.

4.2.1 Materiales y equipos utilizados

- Electrodo de referencia: Electrodo de cobre con sulfato de cobre (CSE): Cu/CuSO₄ (saturado). El contacto electrolítico con la solución se realiza mediante un puente salino formado por un tapón de madera de balsa (Figura 4.1).
- Electrodo de trabajo: Corresponde a la barra de acero ubicada en el centro de la probeta de hormigón (refuerzo).
- Voltímetro digital: Para medición del potencial eléctrico entre el metal y el electrodo de cobre.

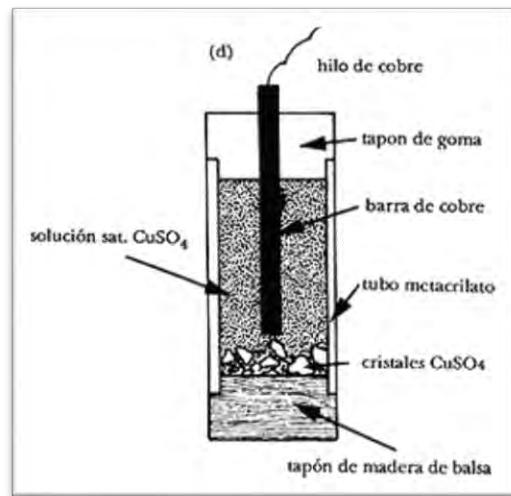


Figura 4.1. Composición Electrodo de ref Cu/CuSO₄. Fuente: Imágenes google S.F.

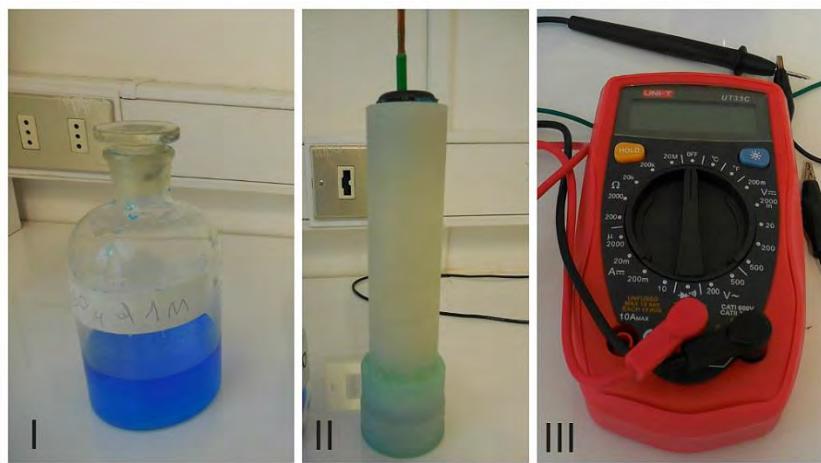


Figura 4.2. I) Solución de CuSO_4 . II) Electrodo de referencia Cu/CuSO_4 . III) Voltímetro. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Procedimiento

- Configurar el voltímetro para registrar medidas en mili voltios (mV).
- Se conecta el voltímetro al electrodo de referencia y al de trabajo, ambos sumergidos en el mismo medio electrolítico (solución de NaCl). El electrodo de referencia debe estar parcialmente sumergido en la solución y el electrodo de trabajo hace contacto con el voltímetro a través del alambre de cobre.
- El electrodo de referencia debe estar saturado con la solución de CuSO_4 al menos 3 cm del tapón de madera de balsa. Antes de su utilización mover ligeramente.



Figura 4.3. Procedimiento medida de potencial. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Resultados obtenidos

La medición de potencial fue registrada desde el día 0 y los distintos tiempos de exposición establecidos. Cumplidos estos tiempos, se retiró cada trío de probetas para su posterior secado.

Como no se pueden tratar por igual los diferentes tipos de probetas dados sus recubrimientos distintos, no es posible realizar un promedio de las mediciones en un determinado tiempo, por lo que la medida de potencial es considerada como un indicador para evaluar la actividad corrosiva en el tiempo de un determinado tipo de probeta.

A continuación se muestran los valores de potencial obtenidos en mili voltios (mV).

	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
A1	-380	-401	-	-	-	-	-	-	-
A2	-158	-179	-198	-	-	-	-	-	-
A3	-180	-185	-201	-190	-	-	-	-	-
A4	-175	-183	-188	-185	-201	-	-	-	-
A5	-167	-185	-208	-215	-221	-232	-	-	-
A6	-111	-123	-121	-145	-153	-196	-180	-	-
A7	-182	-210	-224	-690 (*)	-699	-601	-637	-642	-
A8	-380	-440	-440	-501	-503	-506	-552	-648	-556

Tabla 4.2. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo A. Fuente: Elaboración propia.

(*) Cae una pequeña gota de solución al realizar la medición anterior, por lo que desde esta medición los resultados se encuentran alterados para la probeta A7 y no se consideran para realizar un promedio de valores al momento de graficar.

	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
B1	-395	-459	-	-	-	-	-	-	-
B2	-431	-438	-395	-	-	-	-	-	-
B3	-410	-422	-425	-436	-	-	-	-	-
B4	-148	-160	-184	-154	-202	-	-	-	-
B5	-144	-149	-163	-158	-188	-206	-	-	-
B6	-145	-222	-211	-183	-192	-230	-231	-	-
B7	-162	-191	-214	-332	-318	-377	-394	-424	
B8	-356	-379	-401	-450	-453	-475	-485	-493	-494

Tabla 4.3. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
C1	-356	-441	-	-	-	-	-	-	-
C2	-246	-292	-323	-	-	-	-	-	-
C3	-155	-212	-193	-180	-	-	-	-	-
C4	-170	-224	-204	-170	-178	-	-	-	-
C5	-125	-136	-186	-211	-154	-146	-	-	-
C6	-321	-387	-404	-400	-403	-406	-413	-	-
C7	-102	-198	-176	-140	-147	-130	-118	-118	
C8	-330	-403	-402	-402	-432	-420	-412	-416	-404

Tabla 4.4. Medida de potencial (mV) para las probetas tipo C. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1 Gráficos

A continuación se presentan los valores de potencial obtenidos en gráficos Potencial (mV) v/s tiempo más significativos, incluyendo promedios de potenciales en la medida que sea factible.

- **Gráfico Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 7 días de exposición.**

Corresponde a los valores promedio de las probetas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de los tipos A, B y C, durante 7 días de exposición.

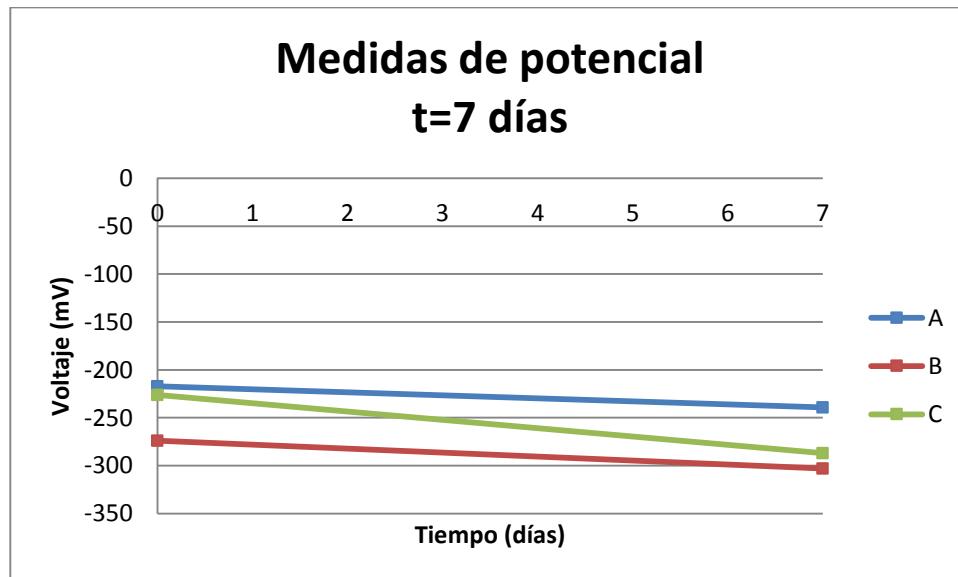


Figura 4.4. Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 7 días de exposición. Fuente: Elaboración propia.

- **Gráfico Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 28 días de exposición.**

Corresponde a los valores promedio de las probetas 4, 5, 6, 7 y 8 de los tipos A, B y C, durante 28 días de exposición. No se incluye en el promedio los valores alterados de la probeta A7.

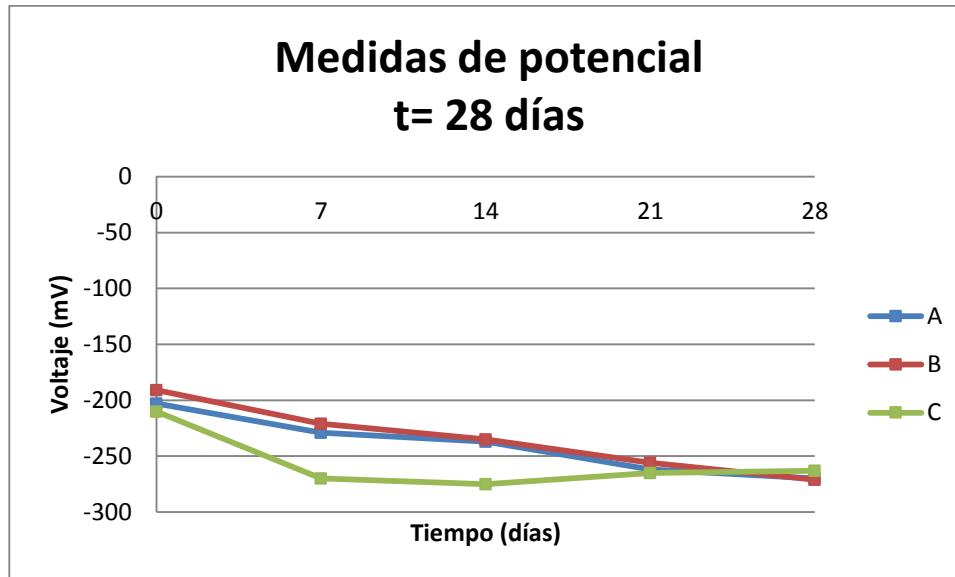


Figura 4.5. . Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 28 días de exposición. Fuente: Elaboración propia.

- **Gráfico Potencial (mV) v/s Tiempo (días) para 68 días de exposición.**

Corresponde a los valores obtenidos en las probetas A8, B8 y C8, durante 68 días de exposición.

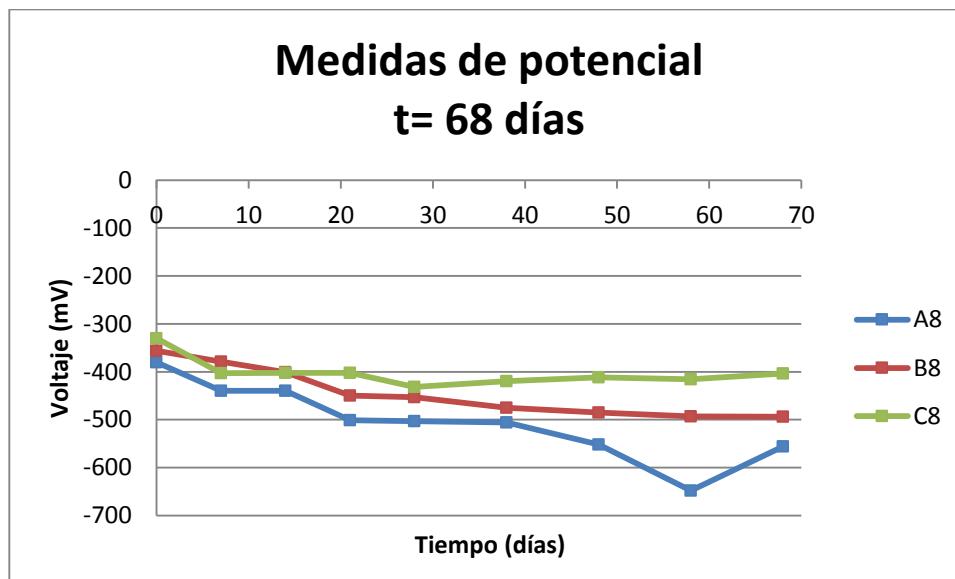


Figura 4.6. Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 68 días de exposición. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Discusión de resultados de medida de potencial eléctrico.

- **Probetas tipo A.**

Las probetas tipo A (recubrimiento 2 cm), presentan medidas de potencial que disminuyen en el tiempo, tendiendo la barra de acero a un estado más activo. Las probetas A1, A2, A3, A4, A5 y A6 poseen variaciones de potencial en el tiempo en rangos reducidos.

Al realizar la medición de potencial en la probeta A7 durante el tiempo T2 (14 días), cae por medio de la manguera una gota de solución en el interior de la probeta, provocando una medida alterada de potencial desde el tiempo T3 (21 días).

Los valores de potencial son inferiores en la probeta A8 (68 días de inmersión), sin considerar los valores alterados de la probeta A7, indicando un estado más activo de la barra en ese momento.

- **Probetas tipo B.**

Las probetas tipo B (recubrimiento 3,25 cm) presentan en general medidas de potencial que tienden a decaer en el tiempo. Las probetas B7 y B8 presentan una variación de potencial más significativa.

Los valores de potencial son considerablemente más negativos en la probeta B8 (68 días de inversión).

- **Probetas tipo C.**

Las probetas tipo C (recubrimiento 5 cm) presentan medidas de potencial en el tiempo variadas. En probetas como la C7 se presenta un aumento de potencial, mientras en otras como las C4 y C5 disminuye y luego aumenta. Las probetas C6 y C8 luego de 7 días presentan valores que tienden a ser constantes.

- **Gráfico Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 7 días de exposición.**

Corresponde al promedio de valores obtenido en todas las probetas. Se observa actividad desde el tiempo 0 en los tres tipos de probetas producto de la disminución del potencial

- **Gráfico Potencial promedio (mV) v/s Tiempo (días) para 28 días de exposición.**

Corresponde al promedio de los valores de las probetas 4, 5, 6, 7, y 8. Los tres tipos de probetas presentan en el tiempo 0 valores similares. En las probetas A y B se observan medidas prácticamente iguales, tendiendo a un estado más activo. Las probetas C se presentan disminución de potencial hasta los 21 días y posteriormente un aumento hasta coincidir con las probetas A y B a los 28 días.

- **Gráfico Potencial (mV) v/s Tiempo (días) para 68 días de exposición.**

Las probetas con tiempo de inmersión de 68 días corresponden a las A8, B8 y C8. Los potenciales disminuyen hasta el término del periodo, indicando una tendencia a un estado más activo. En las probetas B8 y C8 se observa a partir de 48 días valores de potencial constantes.

4.2.4.1 Variación del potencial de estabilización para probetas calificadas como MB, en el tiempo y espesor del recubrimiento

A continuación se presentan las medidas de potencial de las probetas calificadas como muy buenas en la valoración inicial del estado superficial de la Tabla 4.1. Valoración estado superficial de probetas. Fuente: Elaboración propia.

Días	A	B	C
0	-278	-265	-226
38	-506	-353	-276
68	-556	-494	-404

Tabla 4.5. Variación de potencial (mV) para probetas clasificadas MB. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el potencial se hace más reactivo cuando:

- Aumenta el tiempo de exposición al medio agresivo.
- Disminuye el recubrimiento protector del hormigón.

4.3 DIFUSION DEL ION Cl^- 4.3.1 Muestras de polvo de hormigón

Se retiran las probetas de la solución en los tiempos estipulados y se dejan secar para realizar la toma de muestras de polvo.



Figura 4.7. Probetas tiempos 1, 2, 3 y 4 secas luego de ser expuestas a solución salina. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando un taladro con broca de concreto de 8mm, se perforó en dirección radial a la mitad de la altura de cada probeta.



Figura 4.8. Toma de muestras de polvo de hormigón. Fuente: Elaboración propia.

Las perforaciones se realizaron centímetro a centímetro desde el borde, retirando las muestras de polvo en cada avance con ayuda de un pincel. Este proceso se realizó 2 veces en cada probeta, con el fin de obtener una muestra más representativa.

Así, para una probeta del tipo A se obtienen dos muestras de polvo a analizar, para el tipo B tres y para el tipo C cuatro. (Figura 4.9)

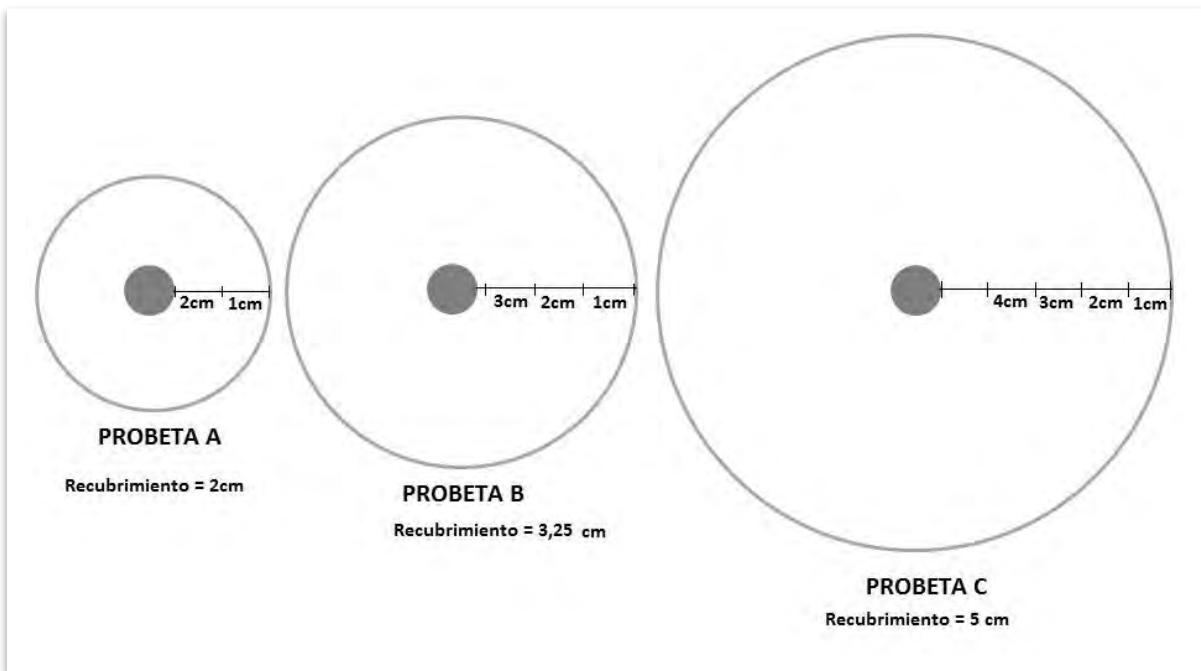


Figura 4.9. Perforaciones para cada tipo de probeta. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se obtienen 72 muestras de polvo de hormigón, las cuales se rotularon de la siguiente forma:

- **A1 1cm** : (Probeta tipo A, retirada en el tiempo 1, perforada entre 0-1 cm)
- **C5 4 cm**: (Probeta tipo C, retirada en el tiempo 5, perforada entre 3-4 cm)

4.3.2 Determinación de concentración de cloruro

La determinación de la cantidad de Cl^- fue realizada en el laboratorio de química general del Campus Isla Teja.

4.3.2.1 Método de Mohr

El método de Mohr consiste en una valoración directa utilizando una solución estandarizada de nitrato de plata (AgNO_3) y como indicador una solución de cromato de sodio (Na_2CrO_4), con el fin de determinar los iones Cl^- .

La solución de AgNO_3 es añadida a la muestra a analizar en pequeñas cantidades mediante titulación y se forma un primer precipitado insoluble de color blanco, cloruro de plata (AgCl).



Sin embargo, es necesario conocer de manera exacta cuando todos los iones Cl^- hayan sido precipitados y se deba dejar de titular; es por eso que el fin de la valoración la determina la formación de un segundo precipitado de color rojizo, cromato de plata (Ag_2CrO_4). Reacción indicadora:



La valoración del método de Mohr se debe llevar a cabo a un pH lo más cercano al neutro. Si se realiza a un pH alto, se genera hidróxido de plata (AgOH), lo que produce un consumo excesivo de iones Ag^+ en la valoración. A su vez, si se realiza a un pH bajo, el cromato pasa a dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, reduciéndose el contenido de iones cromato y retardando la formación del precipitado.

Para el análisis de laboratorio de las muestras de polvo de hormigón se utilizará:

- Solución patrón: Nitrato de plata, AgNO_3 0,01 M (0,01 moles de AgNO_3 en 1000 ml de disolución de AgNO_3).
- Solución indicador: Cromato de sodio, Na_2CrO_4 al 2% P/V (2 g de peso para 100 ml de volumen).

4.3.2.2 Procedimiento experimental

Se registra el peso de cada muestra de polvo de hormigón, se introduce en un vaso precipitado de 100 ml y se solubiliza el cloruro presente en el hormigón con H_2O . (Figura 4.10.I y II.)

Posteriormente se filtra el contenido lentamente agregando agua desionizada hasta completar 30 ml. (Figura 4.10.III)

El líquido filtrado es recibido en un matraz aforado de 50 ml, completando los ml con agua desionizada. (Figura 4.10.IV)



Figura 4.10. Método de Mohr (Parte 1). Fuente: Elaboración propia.

Se toma una alícuota de 25 ml del líquido contenido en el matraz aforado y posteriormente es vaciado en un vaso precipitado de 100 ml.

Se realiza una prueba de pH con papel tornasol (Figura 4.11.I), controlando que este sea lo más cercano a 7, agregando ácido nítrico (HNO_3) o carbonato de calcio (CaCO_3) según sea necesario (Figura 4.11.II). En el caso de utilizar CaCO_3 , se deberá calentar la muestra para expulsar el dióxido de carbono presente, agitando levemente y verificando si se alcanzó el pH necesario. (Figura 4.11.III)

La muestra se enfriá y se agrega 8 gotas de la solución indicador cromato de sodio (Na_2CrO_4), quedando la muestra de color amarillo. (Figura 4.11.IV y V)

Finalmente, por medio de una bureta, se agrega gota a gota a la muestra la solución patrón nitrato de plata (AgNO_3), moviendo levemente el vaso precipitado. Este proceso se realiza cuidadosamente hasta pasar del color blanco del primer precipitado a un color rojizo ladrillo. (Figura 4.11.VI)

Se registra el volumen de nitrato de plata utilizado.

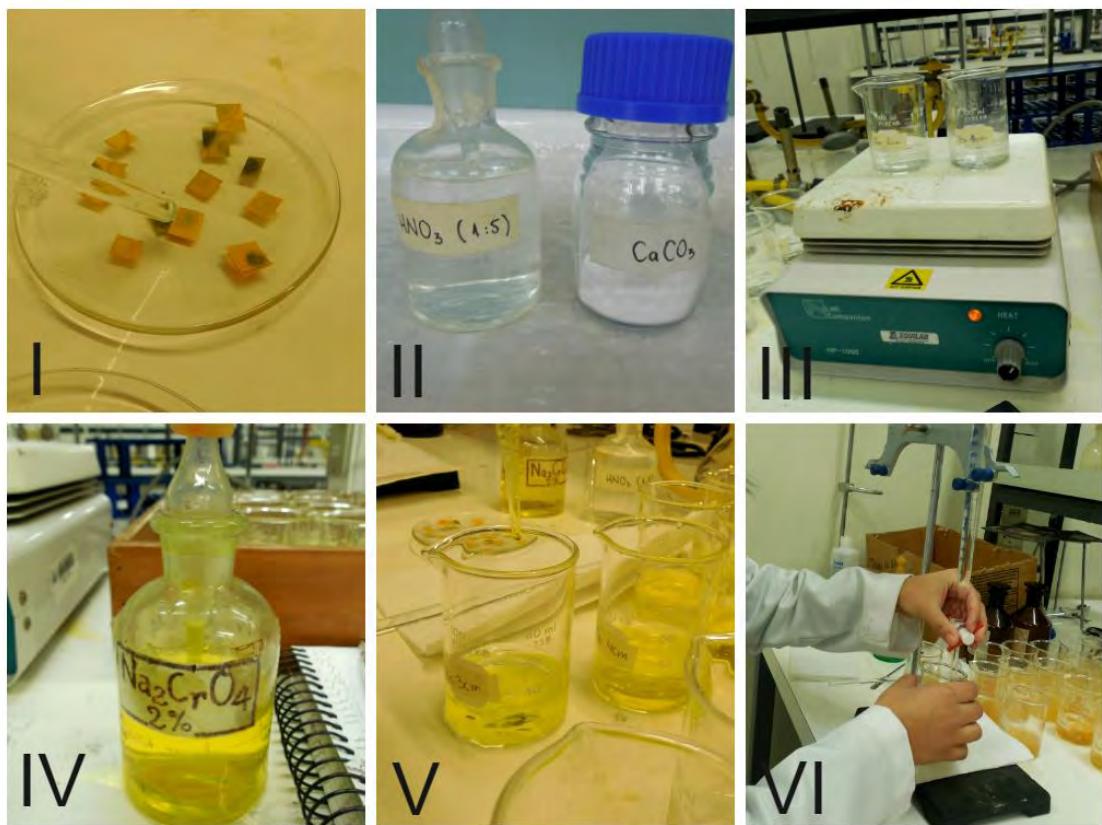


Figura 4.11. Método de Mohr (Parte 2). Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.3 Cálculo concentración de cloruro (ppm)

➤ Cálculo molar (M) de cloruro en la alícuota:

1 mol de AgNO_3 detecta 1 mol de NaCl , por lo tanto:

$$N^{\circ} \text{ mol } \text{NaCl} = N^{\circ} \text{ mol } \text{AgNO}_3 \left(\frac{1 \text{ mol } \text{NaCl}}{1 \text{ mol } \text{AgNO}_3} \right) \quad (13)$$

Así, se tiene:

$$M_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3} = M_{\text{NaCl}} \times V_{\text{NaCl}} \quad (14)$$

Donde:

- M_{AgNO_3} = Molaridad de nitrato de plata.
- V_{AgNO_3} = Volumen de nitrato de plata.
- M_{NaCl} = Molaridad cloruro de sodio.
- V_{NaCl} = Volumen de cloruro de sodio.

Despejando se obtiene la molaridad de NaCl de la muestra.

$$M_{\text{NaCl}} = \frac{M_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3}}{V_{\text{NaCl}}} \quad (15)$$

Datos:

- Molaridad de la solución patrón:

$$M_{\text{AgNO}_3} = 0,01 \text{ M}$$

- Volumen de nitrato de plata:

V_{AgNO_3} = cantidad de AgNO_3 utilizada en la valoración.

- Volumen de NaCl :

$$V_{\text{NaCl}} = 25 \text{ ml} \text{ (volumen de la alícuota)}$$

- Peso de cloruro de la muestra total P_{Cl} (mg):

$$P_{\text{NaCl}} = V_m \times M_{\text{NaCl}} \times PM_{\text{NaCl}} \quad (16)$$

Donde:

- P_{NaCl} = Peso del cloruro de sodio (mg).
 - V_m = Volumen total de la muestra (50 ml).
 - M_{NaCl} = Molaridad del cloruro de sodio obtenida en el punto anterior (milimol/ml).
 - PM_{NaCl} = Peso molecular del NaCl (58,5 mg/milimol).
- Concentración de Cl^- de la muestra (ppm).

$$C_{\text{ppm}} = \frac{1.000 \times P_{\text{NaCl}}}{P_{\text{muestra}}} \quad (17)$$

Donde

- C_{ppm} = Concentración cloruro (ppm)
- P_{NaCl} = Peso del cloruro de sodio (mg), obtenido en el punto anterior.
- P_{muestra} = Peso de la muestra (gr).

4.3.3 Resultados obtenidos

A continuación se presentan los resultados obtenidos de concentración de cloruros para los tres tipos de probetas (A, B y C). Los cálculos realizados se encuentran en el Anexo B.

La concentración de cloruros fue analizada a distintas profundidades y a distintos tiempos de inmersión de las probetas (0, 7, 14, 21, 28, 38, 48, 58 y 68 días). Los valores se encuentran expresados en ppm (partes por millón).

PROBETA A									
Profundidad (cm)	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
1	137	4680	6163	6435	7369	9573	10029	11312	9218
2	130	1339	3063	2086	1976	3211	4491	5471	3682

Tabla 4.6. Concentración de Cl^- presente en el hormigón de las probetas tipo A (ppm). Fuente: Elaboración propia.

PROBETA B									
Profundidad (cm)	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
1	137	4163	5642	4560	7163	9540	9503	11505	13098
2	130	1565	1752	1755	2816	4561	3937	4569	4112
3	120	198	201	269	179	253	187	488	505

Tabla 4.7. Concentración de Cl^- presente en el hormigón de las probetas tipo B (ppm). Fuente: Elaboración propia.

PROBETA C									
Profundidad (cm)	Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 38	Día 48	Día 58	Día 68
1	137	3600	5200	6153	7292	6268	8472	10479	9945
2	130	226	1280	1054	3132	1786	1735	2403	2606
3	120	66	120	175	209	194	193	205	425
4	65	146	130	144	121	382	133	182	110

Tabla 4.8. Concentración de Cl^- presente en el hormigón de las probetas tipo C (ppm). Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.1 Gráficos

- Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s tiempo para cada tipo de probeta.

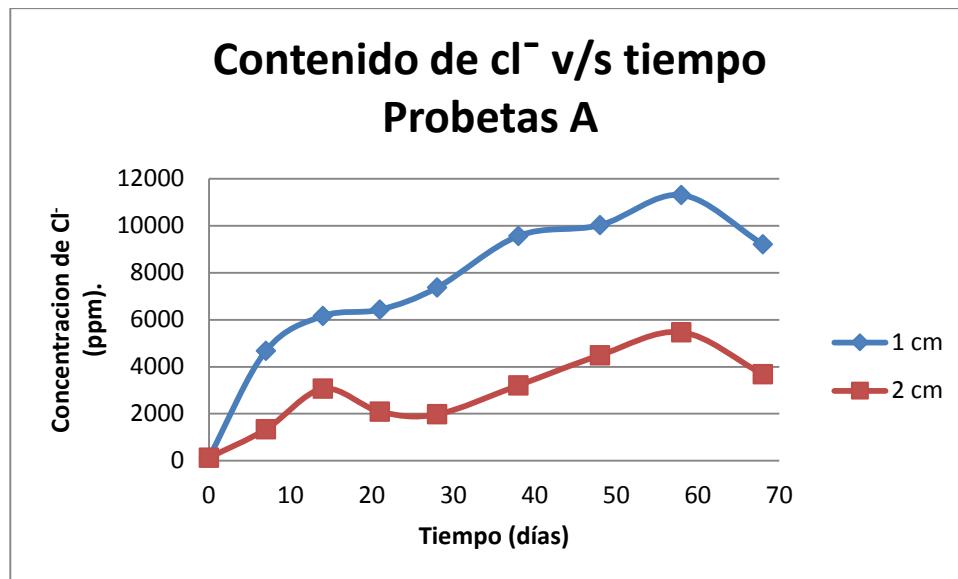


Figura 4.12. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas A. Fuente: Elaboración propia.

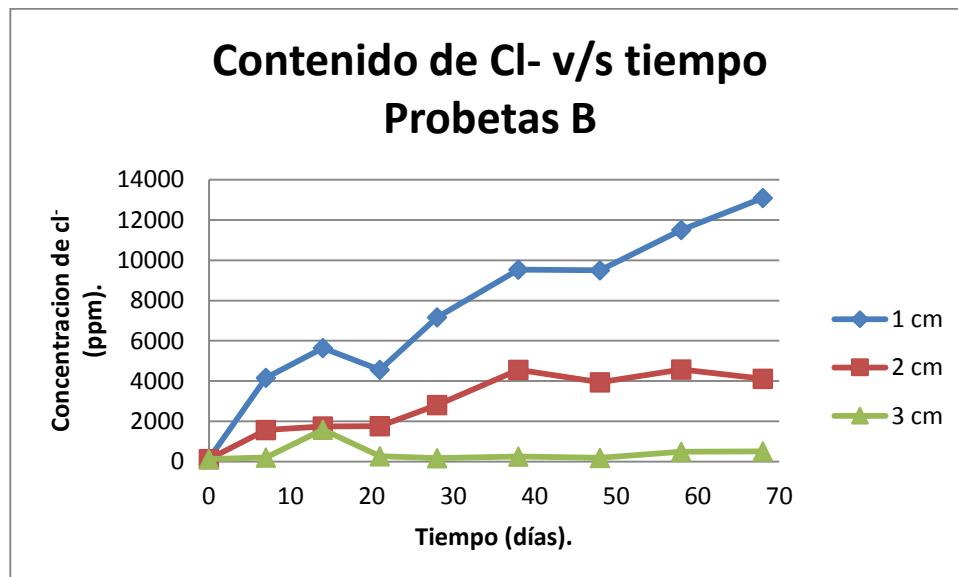


Figura 4.13. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas B. Fuente: Elaboración propia.

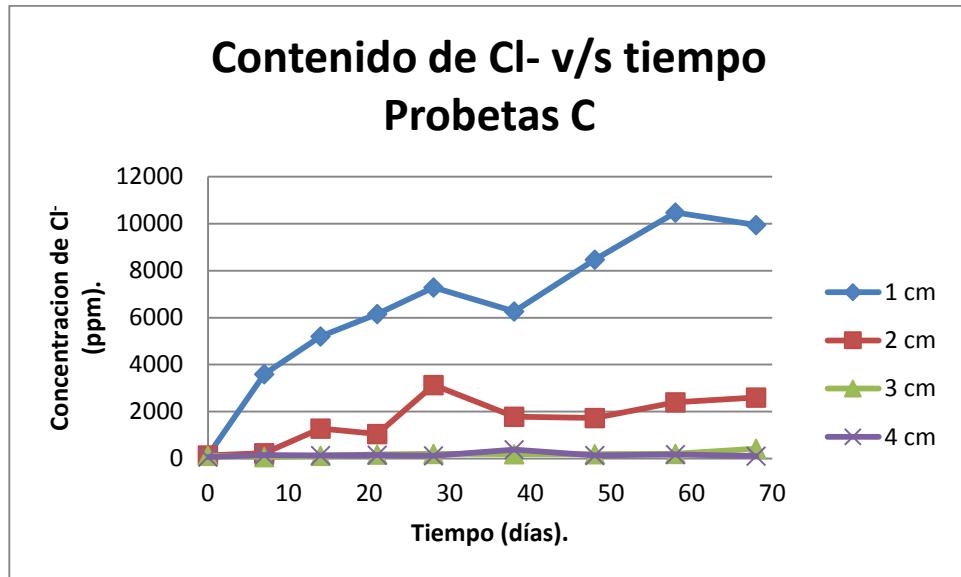


Figura 4.14. Concentración de cloruro v/s tiempo para probetas C. Fuente: Elaboración propia.

- Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s tiempo para las distintas profundidades.

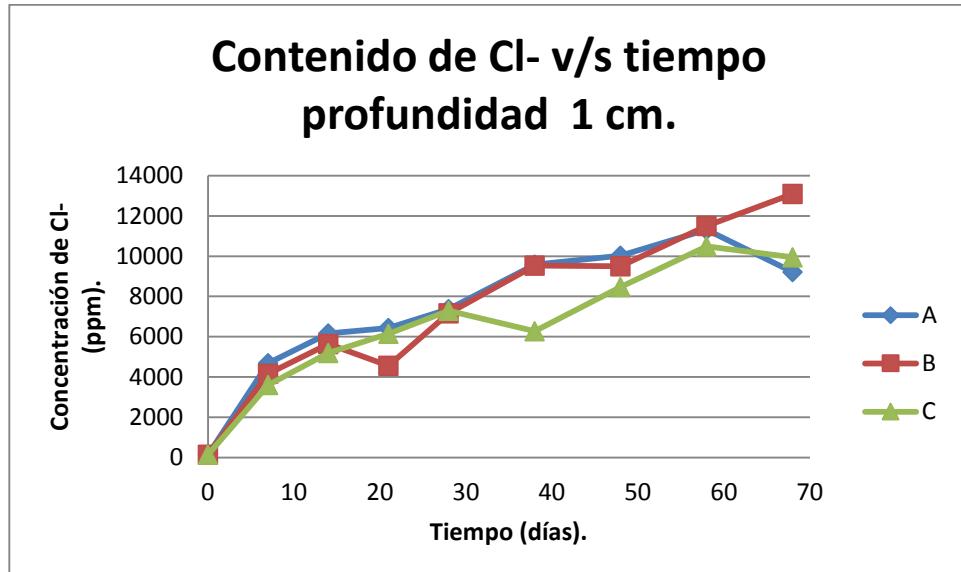


Figura 4.15. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 1 cm. Fuente: Elaboración propia.

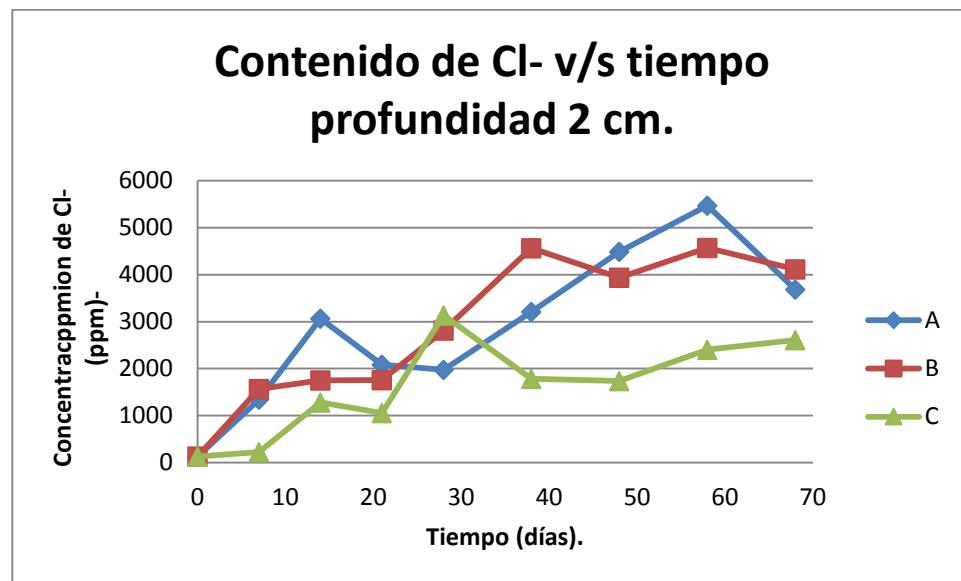


Figura 4.16. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 2 cm. Fuente: Elaboración propia

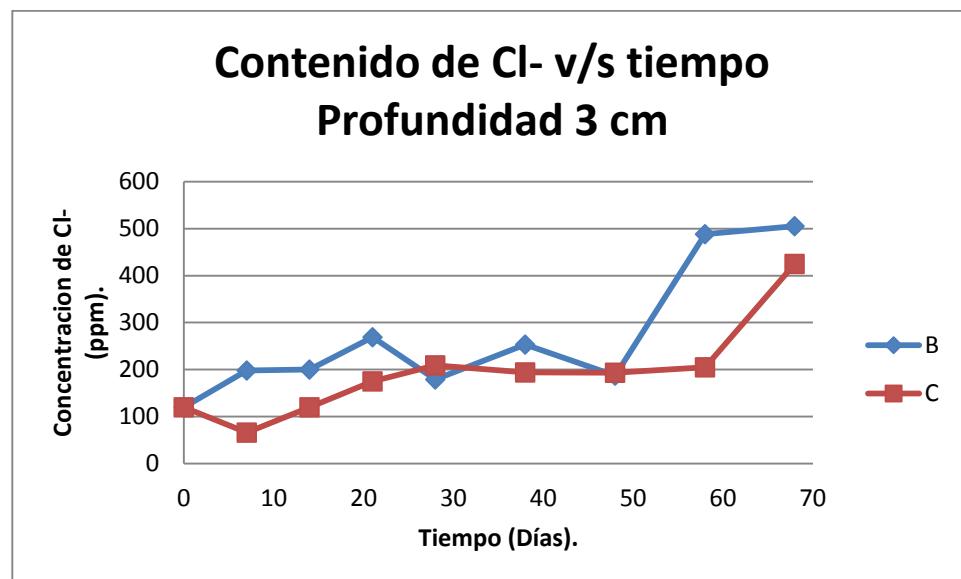


Figura 4.17. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 3 cm. Fuente: Elaboración propia

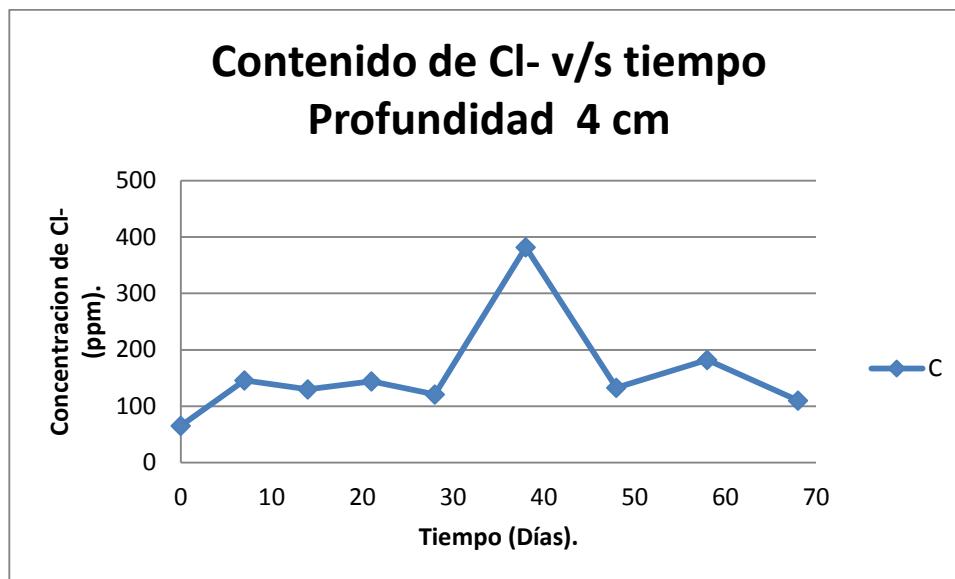


Figura 4.18. Concentración de cloruro v/s tiempo para profundidad 4 cm. Fuente: Elaboración propia

- Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s radio para los distintos tipos de probetas.

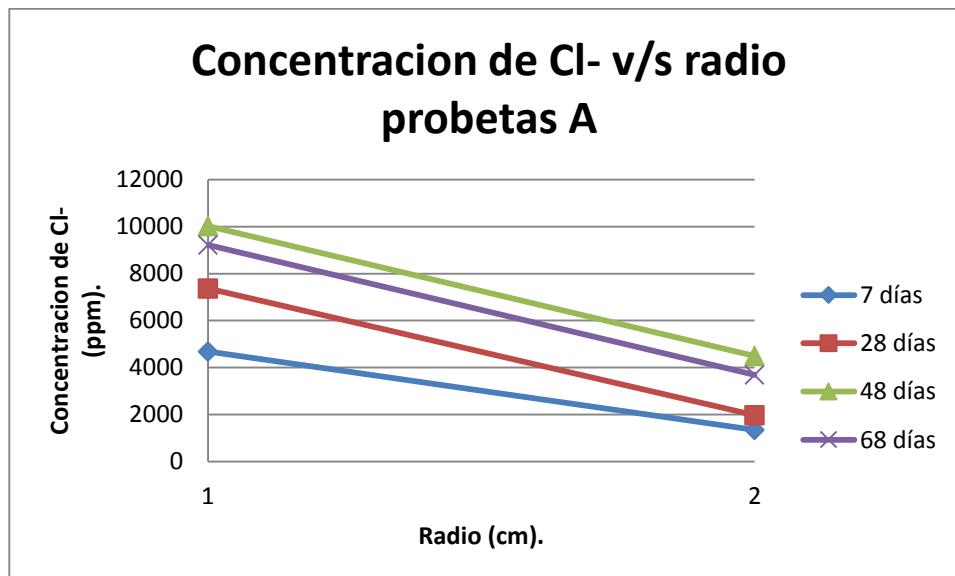


Figura 4.19. Concentración de cloruro v/s radio para probetas A. Fuente: Elaboración propia

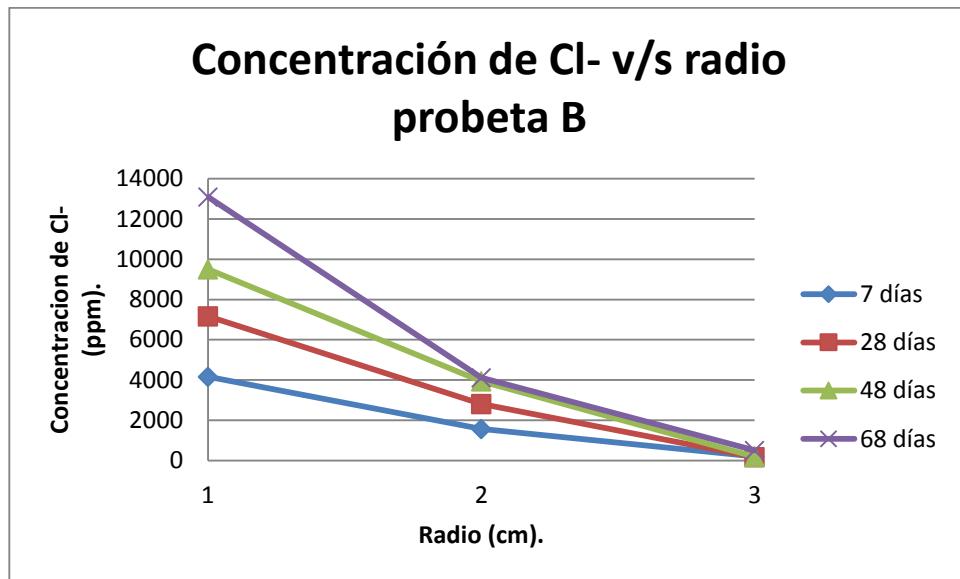


Figura 4.20. Concentración de cloruro v/s radio para probetas B. Fuente: Elaboración propia.

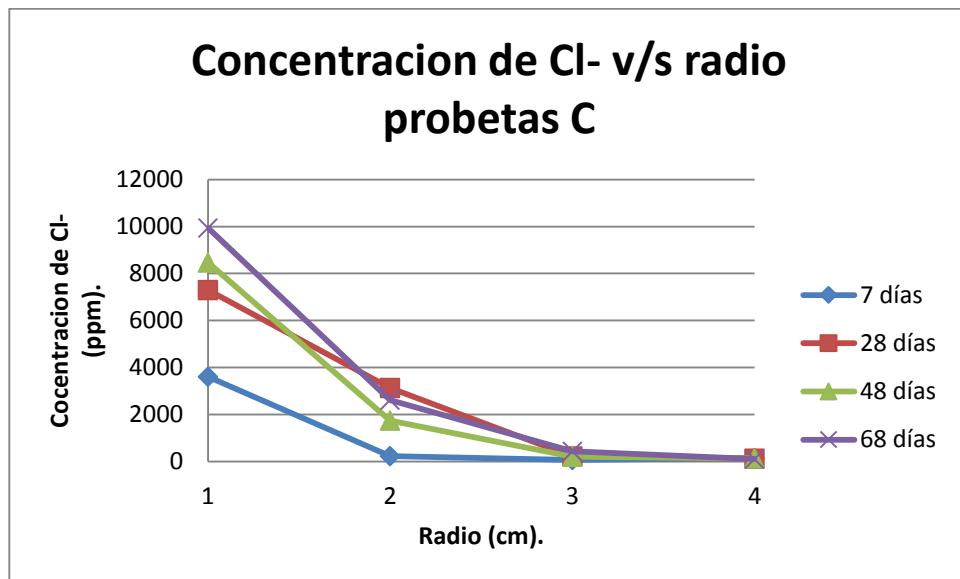


Figura 4.21. Concentración de cloruro v/s radio para probetas C. Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Discusión de resultados de difusión de ion Cl⁻

- **Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s tiempo para cada tipo de probeta.**

Para los 3 tipos de probetas se presenta un aumento progresivo en el tiempo de la concentración de Cl⁻.

En las probetas A se registra una disminución de la concentración en los últimos 10 días, esto ocurre debido a que al tener un recubrimiento reducido (2 cm), el proceso de hormigonado influye en la difusión del ion Cl⁻. Es por esta razón que en un inicio se realizó una inspección visual de cada probeta, clasificándolas según su estado superficial, eligiendo la que se encontraba en mejor estado para los 68 días de inmersión (A8), lo que explica la disminución de la concentración en este tiempo.

- **Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s tiempo para las distintas profundidades.**

Para la profundidad de 1cm (0-1 cm) se observa que las 3 probetas presentan concentraciones de cloruro similares. En las probetas A y B se observa la disminución de concentración de Cl⁻ en el último intervalo, debido al buen estado superficial de las probetas A8 y B8. En las probetas C no ocurre esta situación, ya que tienen un recubrimiento mayor que facilitó su hormigonado.

Para 2 cm de profundidad (1-2 cm) las probetas A y B presentan una concentración similar, mientras las probetas C, a partir de los 28 días, registran valores menores que tienden a estabilizarse.

Para 3 cm de profundidad (2-3cm) se registran valores sólo para las probetas B y C, los cuales tienden a ser estables, aumentando en los últimos 20 días. A los 68 días presentan valores similares.

Para 4 cm de profundidad (3-4 cm) se registran valores sólo para las probetas C, los cuales tienden a ser estables en el tiempo, aumentando sólo a los 38 días.

- **Gráficos concentración de cloruro en el hormigón v/s radio para los distintos tipos de probetas.**

Probeta A: En los diferentes tiempos de inmersión se registra una variación proporcional entre los contenidos de Cl⁻ a 1 cm de profundidad y a 2 cm hasta los 58 días. Luego se presentan valores inferiores debido al estado superficial de la probeta explicado anteriormente.

Probeta B: Durante el primer intervalo (1-2 cm), las curvas son más pronunciadas, debido a una mayor concentración del ión Cl⁻ producto de la saturación de las paredes del hormigón. Posteriormente, en el siguiente intervalo (2-3 cm), va disminuyendo gradualmente la concentración, debido a la discontinuidad que se produce en la interconexión de poros en la masa del hormigón; finalizando a los 3 cm con una concentración constante para los distintos tiempos de inmersión.

Probeta C: Durante el primer intervalo (1-2 cm) las curvas son más pronunciadas, disminuyendo en el siguiente intervalo (2-3 cm) hasta llegar a valores constantes para los 3 y 4 cm, donde los niveles se concentran prácticamente los iniciales (tiempo 0).

En los primeros 7 días de exposición se registra el aumento más significativo de la concentración de Cl⁻.

La difusión del ión Cl⁻ presenta valores elevados hasta una profundidad radial de 2 cm, luego los valores decrecen considerablemente, llegando a ser incluso muy cercanos a los de la muestra patrón (Día 0).

En las probetas A se alcanzan valores de concentración considerables a los 2 cm. En las probetas B y C en general no se alcanzan valores a considerar de concentración en profundidades cercanas al acero

4.3.4.1 Difusión de iones cloruro en probetas calificadas MB

A continuación se presenta la difusión de iones cloruros de las probetas calificadas como muy buenas en la valoración inicial del estado superficial de la Tabla 4.1. Valoración estado superficial de probetas. Fuente: Elaboración propia.

Días	Probeta	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
28	A	7232	1846	-	-
	B	7026	2686	59	-
	C	7155	3002	89	56
68	A	9081	3552	-	-
	B	12961	3982	385	-
	C	9808	2476	305	45

Tabla 4.9. Difusión de iones cloruros en probetas MB. Fuente: Elaboración propia

Se observa:

- El avance del ión cloruro incrementa con el tiempo y disminuye en la medida que se aleja de la superficie del hormigón, en contacto con el electrolito.
- Los espesores de 3,25 cm (B) y 5 cm (C) son efectivos en detener el avance para 68 días.

4.4 EL HORMIGÓN COMO MATERIAL NO HOMOGÉNEO

Con el fin de conocer como varía la difusión del ion Cl⁻ en el hormigón, se tomaron 3 muestras de polvos de hormigón a dos probetas, con una distancia radial de 0 a 2 cm. Los resultados se muestran en la Tabla 4.10, donde se aprecia que los niveles de concentración de Cl⁻ difieren, situación que se puede explicar debido a la estructura de poros del mismo, comprobando que el hormigón no se comporta como un material homogéneo.

Probeta	Radio	Peso muestra (gr)	vol AgNO ₃ (ml)	Ppm de NaCl en muestra filtrada
B4	0-2 cm	1,61	6	4360
B4	0-2 cm	1,59	7,6	5592
B4	0-2 cm	1,82	10,1	6493
C4	0-2 cm	1,64	8,8	6278
C4	0-2 cm	1,57	10,1	7527
C4	0-2 cm	2,14	11,8	6451

Tabla 4.10. Concentración de Cl⁻ (ppm) repetida en algunas probetas. Fuente: Elaboración propia.

Probetas	Ppm de NaCl promedio.
B4	5482
C4	6752

Tabla 4.11. Ppm de NaCl promedio. Fuente: Elaboración propia.

Comparando ambos promedios de concentraciones, se presenta una diferencia de 1270 ppm entre las probetas B4 y C4. Esta diferencia se observa al menos una vez entre cada trio de resultados de una misma probeta, comprobando que si se puede presentar una diferencia significativa entre distintas mediciones de concentración en ellas.

Estas mediciones se realizaron a nivel del acero del hormigón, si se realiza en los extremos se esperan mayores diferencias de concentración.

Algunos de los factores que influyen en la no homogeneidad del hormigón son los distintos tamaños de áridos, la composición del cemento, la relación A/C, el proceso de hormigonado y las posibles fisuras presentes.

Esto se puede observar al realizar la toma de muestras de polvos de hormigón, obteniéndose muestras con distintos colores, como se aprecia en la Figura 4.22.



Figura 4.22. Muestra de polvo de hormigón. Fuente: Elaboración propia.

4.5 VARIACION DE CONCENTRACION DE CL⁻ DE SOLUCION DE INMERSION

La solución de inmersión correspondiente a cloruro de sodio (NaCl) con un 3,5 % P/V, se preparó con una balanza granataria, dada la gran cantidad de litros que fueron utilizados (200 litros). Para realizar el análisis de la variación de concentración, fue necesario realizar una titulación del contenido de cada cubeta, con el fin de obtener un valor de concentración exacto, debido a las variaciones de concentración que pueden existir entre cubetas producto de la imprecisión de la balanza y la preparación de la solución en distintas tandas.

4.5.1 Procedimiento

- Homogeneizar el contenido de cada cubeta y tomar una muestra del mismo. (Figura 4.23;**Error! No se encuentra el origen de la referencia..!**)
- Determinar mediante el método de Mohr el contenido de cloruro de cada cubeta antes de ser sumergidas las probetas, registrando los valores exactos.
- Finalizado el tiempo de inmersión de las probetas, se toma una muestra de la solución y se determina el contenido de cloruro de la misma mediante el método de Mohr. (Figura 4.23. II y III).

- Obtener el contenido de cloruros perdido en la solución y compararlo con el contenido de cloruro absorbido por cada trío de probetas utilizando los valores obtenidos en el apartado anterior.



Figura 4.23. Obtención concentraciones de Cl- mediante método de Mohr. Fuente: elaboración propia.

4.5.2 Determinación de la variación de concentración

La variación de la concentración se determinó obteniendo la diferencia entre la cantidad de gramos perdidos por la solución de inmersión y los gramos absorbidos por cada trío de probetas.

- Cálculo molar (M) de cloruro en la alícuota:

$$M_{\text{NaCl}} = \frac{M_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3}}{V_{\text{NaCl}}} \quad (18)$$

Datos:

- Molaridad de la solución patrón:

$$M_{AgNO_3} = 0,04923 \text{ M}$$

- Volumen de nitrato de plata:

$$V_{AgNO_3} = \text{cantidad de } AgNO_3 \text{ utilizada en la valoración.}$$

- Volumen de NaCl :

$$V_{NaCl} = 2 \text{ ml (volumen de la alícuota)}$$

- Peso de NaCl (gr) en 1 litro de solución:

$$P_{NaCl} = 1 \text{ litro solución} \times M_{NaCl} \times PM_{NaCl} \quad (19)$$

Donde:

- P_{NaCl} = Peso del cloruro de sodio (gr).
- M_{NaCl} = Molaridad del cloruro de sodio obtenida en el punto anterior. (mol/L)
- PM_{NaCl} = Peso molecular del NaCl (58,5 gr/mol).

- Gramos de NaCl perdidos en la solución de cada cubeta.

$$gr_{perdidos} = \left[\left(\frac{gr}{L} \right)_{inicial} - \left(\frac{gr}{L} \right)_{final} \right] \times 20L \quad (20)$$

- En cada cubeta se utilizaron 20 L de solución.
- Para el cálculo de los gr/L luego de retirar las probetas, se utilizó agua destilada hasta completar los 20
- Gramos de NaCl absorbidos por cada trio de probetas.

Utilizando un promedio del peso de cada tipo de probeta (A, B y C), se obtienen los gramos absorbidos por cada trio para los diferentes tiempos de inversión.

$$gr_{absorbidos} = \frac{C_{ppm} \times P_{probeta}}{1000000} \quad (21)$$

Donde:

- C_{ppm} = Concentración cloruro (ppm)
- $P_{probeta}$ = Peso promedio de probetas (gr)

Probeta A	718 gr
Probeta B	1950 gr
Probeta C	4260 gr

Tabla 4.12. Peso promedio de probeta. Fuente: elaboración propia.

4.5.3 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se resumen en las siguientes tablas, la totalidad de los cálculos realizados se presentan en el Anexo C.

- Gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión.

Cubeta	gr/L NaCl inicial	g/L NaCl final	g/L NaCl perdidos	gr perdidos por cubeta
1	35,42	33,69	1,727973	34,56
2	35,71	33,26	2,44796175	48,96
3	35,71	33,26	2,44796175	48,96
4	35,28	31,82	3,455946	69,12
5	35,42	31,54	3,88793925	77,76
6	35,86	31,97	3,88793925	77,76
7	35,28	30,38	4,8959235	97,92
8	34,99	29,81	5,183919	103,68

Tabla 4.13. gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión. Fuente: Elaboración propia.

- Gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas

Cubeta	gr absorbidos
1	33,08
2	52,79
3	51,02
4	72,33
5	73,93
6	81,87
7	100,87
8	99,56

Tabla 4.14. gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas. Fuente: Elaboración propia

- Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión.

cubeta	gr absorbidos	gr perdidos	gr diferencia
1	33,08	34,56	-1,48
2	52,79	48,96	3,83
3	51,02	48,96	2,06
4	72,33	69,12	3,22
5	73,93	77,76	-3,83
6	81,87	77,76	4,11
7	100,87	97,92	2,95
8	99,56	103,68	-4,12

Tabla 4.15. Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión. Fuente: Elaboración propia.

4.5.4 Discusión de resultados de variación de concentración en solución de inmersión.

En la Tabla 4.13 se observa que al realizar la titulación de la solución de NaCl preparada al 3,5 % P/V antes de sumergir las probetas se presentan valores mayores a 35 gr/L (gr/L NaCl inicial), esto ocurre debido a que al realizar una gran cantidad de solución (200 L) y en distintas tandas se producen alteraciones de este orden.

Los gramos de NaCl absorbidos por cada trío de probetas (Tabla 4.15), son obtenidos a partir de los cálculos de concentración en ppm del apartado 4.3 (difusión del ión Cl⁻) de este capítulo. Los valores tienden a aumentar en el tiempo como es esperado, menos en dos casos, lo que ocurre producto de las diferencias en el estado de las probetas debido al proceso de hormigonado.

La diferencia entre los gramos de NaCl absorbidos por las probetas y los gramos que perdió la solución de inmersión varían entre 1,48 y 4,11 gr. Esta diferencia se puede producir debido a que el hormigón es un material no homogéneo, por lo que la cantidad de NaCl en una misma probeta varía. Por ejemplo, se puede esperar que luego de retirar las probetas de la solución de inmersión, el NaCl decante hasta la parte inferior de la misma y como el fin de obtener la concentración de cloruro en el apartado 4.3 es analizar su valor a la altura del acero, los valores pueden no ser representativos de la totalidad del hormigón.

CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO EN EL ACERO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

5.1 INTRODUCCIÓN

Para el análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM.) y el microanálisis (EDAX.) se analizó el acero de refuerzo de las probetas correspondientes al tiempo máximo de inmersión (68 días), además de una muestra de acero sin hormigón (como se encuentra en el mercado) y una que fue sumergida sin hormigón en la solución de NaCl durante los 68 días (Figura 5.1). A continuación se especifica el grupo de muestras analizadas:



Figura 5.1. Acero sumergido en solución de NaCl. Fuente: Elaboración propia.

Muestra acero.	Recubrimiento (cm).	Días de exposición.	Limpieza.
D0 _{ultra}	0	0	Ultrasonido
D8 _{ultra}	0	68	Ultrasonido
A8 _{seco}	2	68	En seco
A8 _{ultra}	2	68	Ultrasonido
B8 _{seco}	3,25	68	En seco
B8 _{ultra}	3,25	68	Ultrasonido
C8 _{seco}	5	68	En seco
C8 _{ultra}	5	68	Ultrasonido

Tabla 5.1. Grupo de muestras analizadas mediante microscopía electrónica de barrido. Fuente: Elaboración propia

Para cada muestra de acero se realizaron 3 análisis SEM con escala de 10, 20 y 100 μm , magnificación 500,2000 y 6000 respectivamente, todas en puntos distintos de la superficie. El microanálisis se realizó en otros 3 puntos de la superficie.

5.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Los fragmentos de acero fueron extraídos de las probetas y luego cortados como se muestra en la imagen de la Figura 5.2.I. A cada fragmento se le realizó un grabado en la cara de apoyo, con el fin de no confundir las muestras.

Los fragmentos de acero se trataron con una máquina para limpieza de residuos mediante ultrasonido en acetona (Figura 5.2.II) y con limpieza en seco mediante una escobilla fina, según la tabla anterior (Tabla 5.1). Las probetas tratadas con ultrasonido fueron depositadas en una cámara a 40° durante toda una noche antes de ser analizadas (Figura 5.2.III).

Finalmente, las muestras son incorporadas en el microscopio electrónico de barrido, como se muestra en la Figura 5.2.IV



Figura 5.2. Preparación de muestras de acero para análisis por SEM y EDAX. Fuente: Elaboración propia

5.3 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE ACERO

5.3.1 Ánalisis muestra de acero D0 con limpieza en ultrasonido (D0_{ultra})

Muestra correspondiente al acero como se encuentra en el mercado, es decir, sin hormigón y sin ser expuesto a la solución de NaCl.

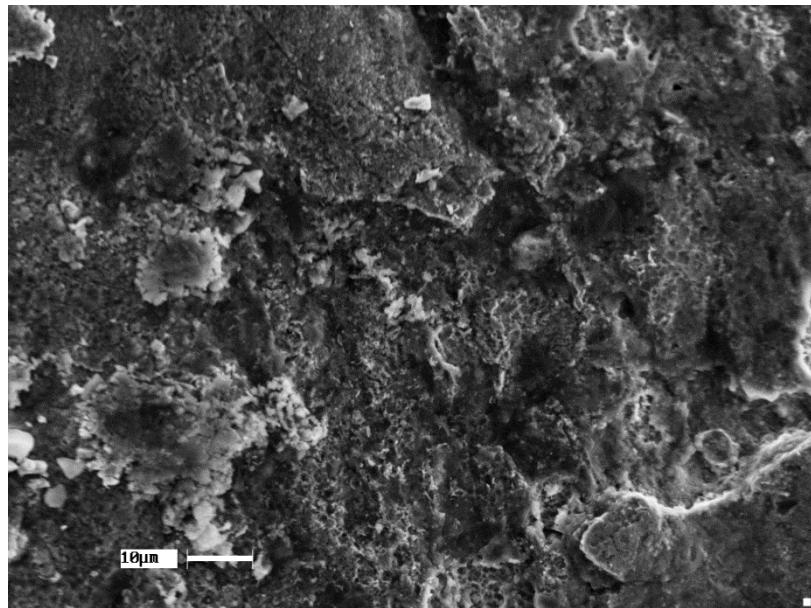


Figura 5.3. Muestra de acero D0_{ultra} con microscopía electrónica de barrido (10 μm). Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia en zonas una morfología superficial característica de los óxidos de hierro.

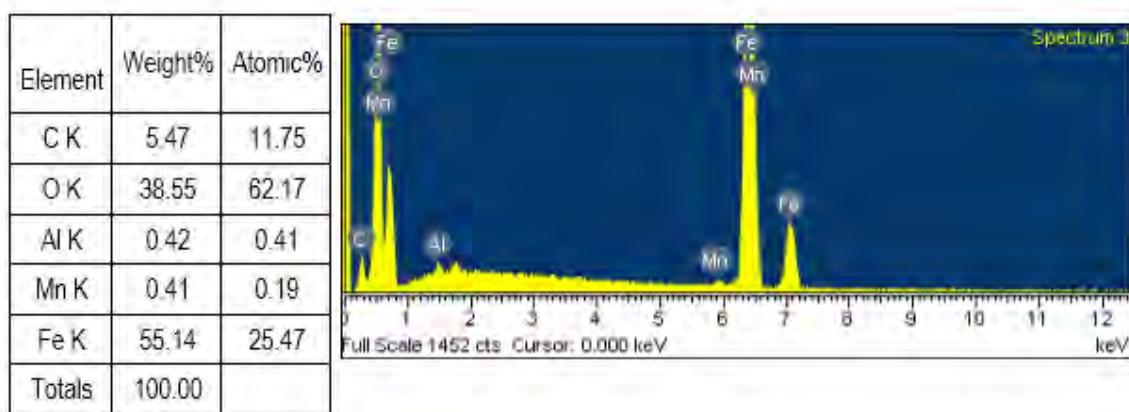


Figura 5.4. Microanálisis muestra D0_{ultra}. Fuente: elaboración propia

En los análisis químicos por EDAX se observan concentraciones de oxígeno que varían entre 13-39%, lo que indica la existencia de diferentes grados de oxidación a nivel superficial. La diferencia en los grados de oxidación implica tendencia a posteriores corrosiones locales. El análisis químico además detecta Fe, Mn, Cr, Al, etc.

5.3.2 Análisis muestra de acero D8 con limpieza en ultrasonido (D8_{ultra})

Muestra de acero correspondiente al acero de refuerzo sumergido 68 días en solución de NaCl con un 3,5% P/V.

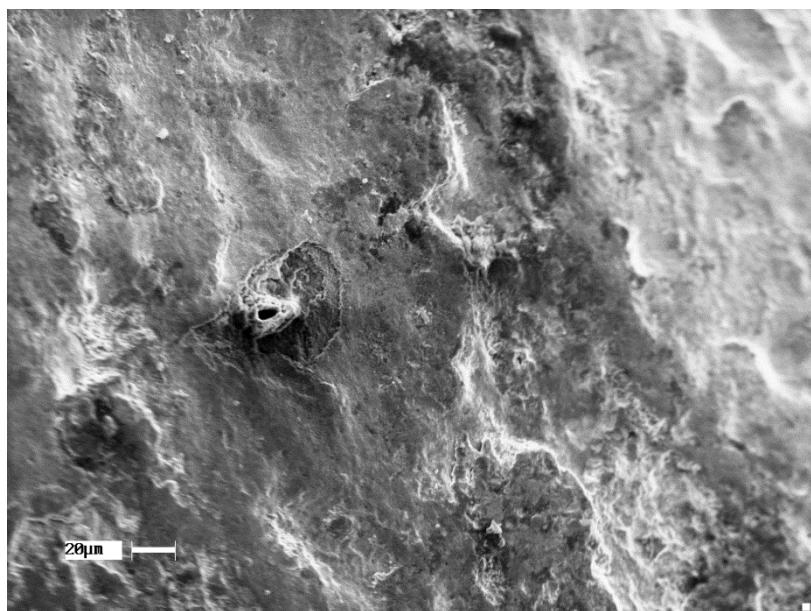


Figura 5.5. Muestra de acero D8_{ultra} con microscopía electrónica de barrido (20 μ m). Fuente: Elaboración propia.

La morfología de la muestra evidencia un grado de oxidación, representada en la imagen por las tonalidades blancas, característica de la acción del electrolito sobre el metal. Se presentan también sustratos de óxidos y productos de corrosión, no se observa picado.

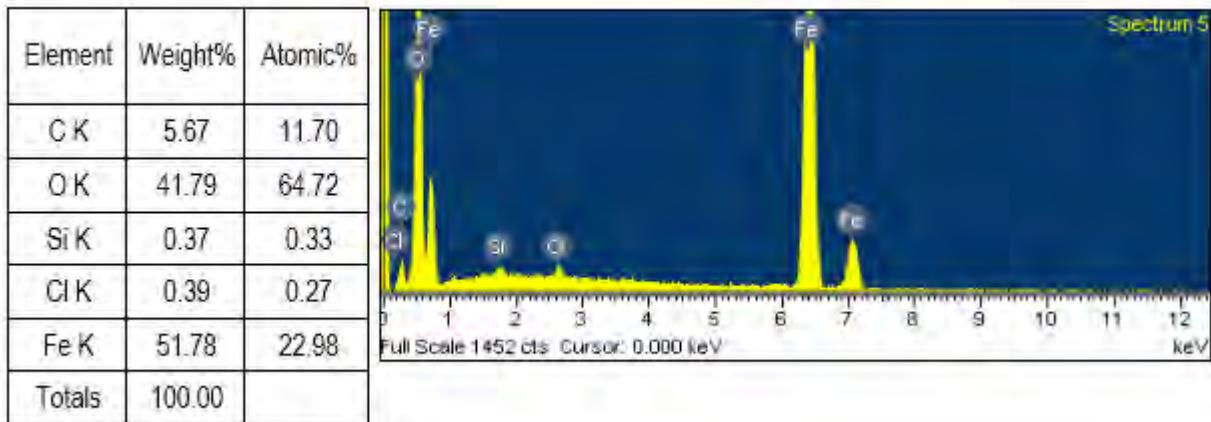
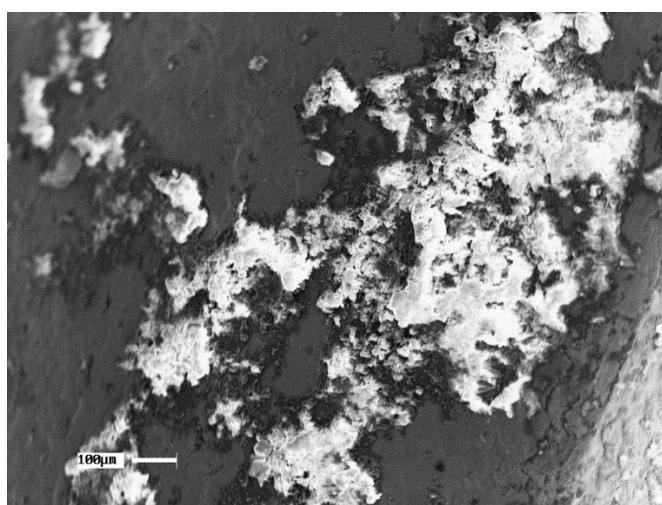


Figura 5.6. Microanálisis muestra D8 ultra. Fuente: elaboración propia..

El análisis EDAX demuestra la interacción química con el cloro, a medida que se incrementa el porcentaje de Cloro (0.32-0.39 %) se incrementa la oxidación superficial del hierro (40.5-42%). Sin embargo, en uno de los tres análisis no se detectó cloro, lo que indica que el estado de interacción físico-química no fue generalizado sobre la superficie.

5.3.3 Análisis muestra de acero de probeta A8 con limpieza en seco ($A8_{seco}$)

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta A8 (68 días de inmersión) limpiada en seco.

Figura 5.7. Muestra de acero $A8_{seco}$ con microscopía electrónica de barrido (100 μm). Fuente: Elaboración propia.

En las imágenes con escala de 100 μm y 20 μm se observa parcialmente la superficie del acero con residuos de concreto. En la imagen de escala 10 μm sólo se tiene morfología de concreto disperso en forma de gránulos, sustratos con capas y residuos superpuestos.

En la Figura 5.7 (100 μm), en su extremo superior izquierdo, se observa una zona de microcorrosión localizada del acero, evidenciada por manchas oscuras puntuales, correspondiente a un ataque incipiente que no alcanza a ser un picado más intenso.

Element	Weight%	Atomic%
CK	20.07	37.12
OK	26.61	36.94
Na K	0.85	0.82
Al K	1.07	0.88
Si K	2.42	1.91
SK	0.68	0.47
Cl K	0.29	0.18
KK	0.83	0.47
Ca K	15.57	8.63
Fe K	31.62	12.57
Totals	100.00	

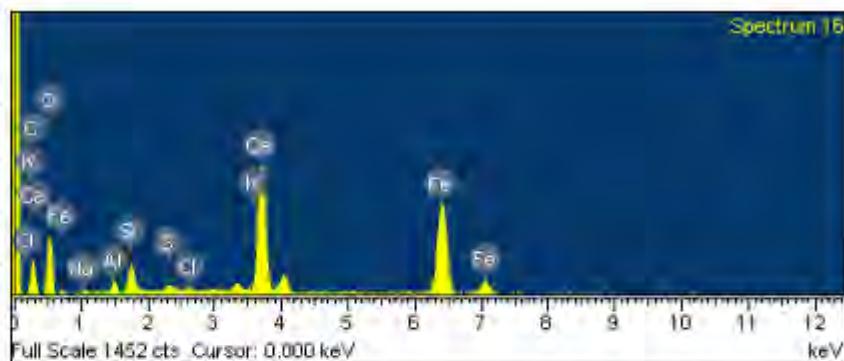


Figura 5.8. Microanálisis muestra A8_{seco}. Fuente: elaboración propia.

En análisis EDAX evidencia la presencia de cloro en sólo una de las tres superficies analizadas. El análisis químico detecta elementos constituyentes del concreto: Ca, Si, Mg, S, Al, P, K, Al, etc.

5.3.4 Análisis muestra de acero de probeta A8 con limpieza en ultrasonido (A8_{ultra})

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta A8 (68 días de inversión) limpiada con ultrasonido.

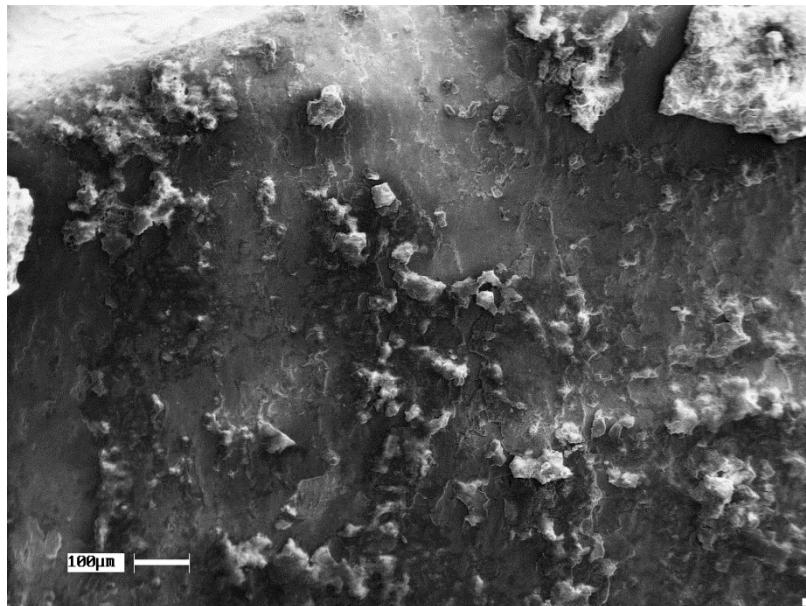


Figura 5.9. Muestra de acero A8_{ultra} con microscopía electrónica de barrido (100 μ m). Fuente: Elaboración propia.

Se observa una incipiente microcorrosión localizada en el lado izquierdo-centro de la muestra (pequeñas manchas oscuras y puntuales), sin embargo éstas no alcanzan a generar un picado y corresponden más bien a acción primaria de corrosión superficial. En el resto de la superficie evidencia sustratos de hormigón.

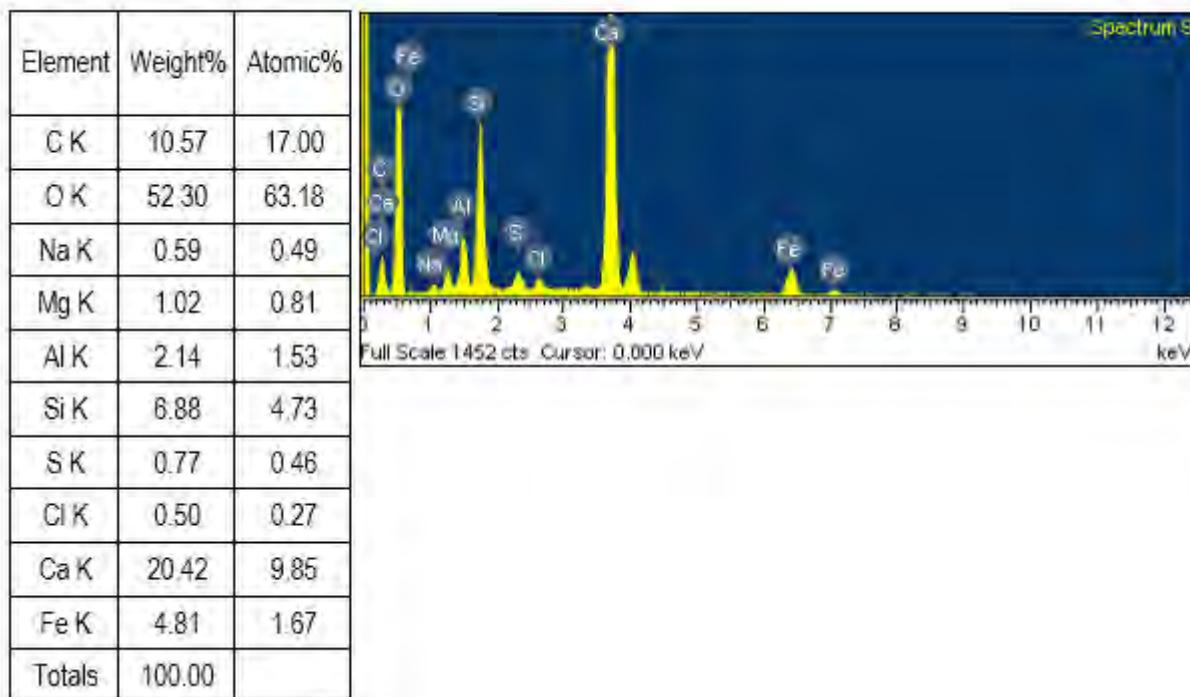


Figura 5.10. Microanálisis muestra A8ultra. Fuente: elaboración propia.

En las tres superficies analizadas se detecta cloro, los porcentajes varían entre un 0.39 % y un 0.5%, pero sólo en una de las imágenes del análisis por SEM se evidencia una microcorrosión superficial.

La presencia de cloro y altos porcentajes de oxígeno (35-52% aprox.) podría explicarse por la existencia de productos de corrosión bajo los residuos de concreto. En los análisis EDAX de esta muestra se incrementa el porcentaje de cloro con respecto a la misma muestra limpiada en seco (A8seco), posiblemente por la menor densidad de residuos de concreto debido a la limpieza de la misma.

5.3.5 Ánalysis muestra de acero de probeta B8 con limpieza en seco (B8_{seco})

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta B8 (68 días de inmersión) limpiada en seco.

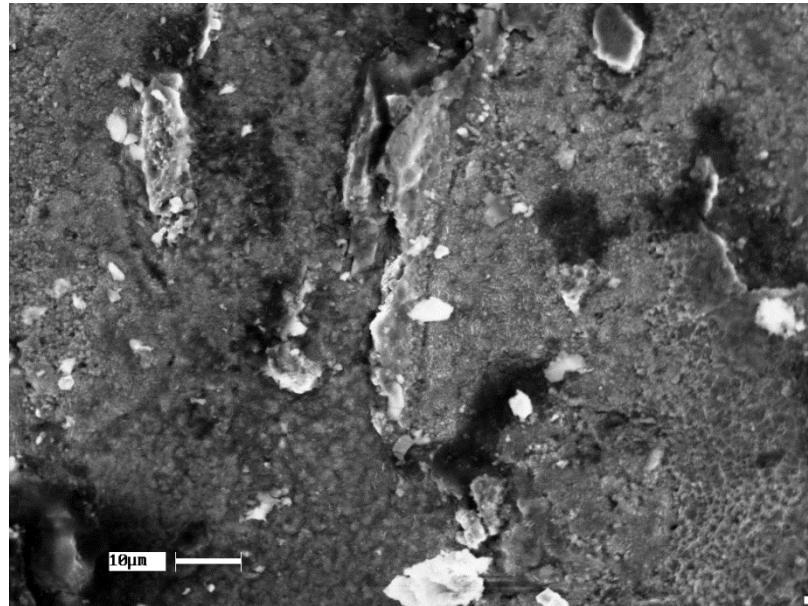


Figura 5.11. Muestra de acero B8_{seco} con microscopía electrónica de barrido (10µm). Fuente: Elaboración propia.

Para las tres magnificaciones 100, 20 y 10 µm se observa una morfología característica del concreto: poros, gránulos finos y sustratos. Los residuos de concreto no permiten observar la superficie del acero.

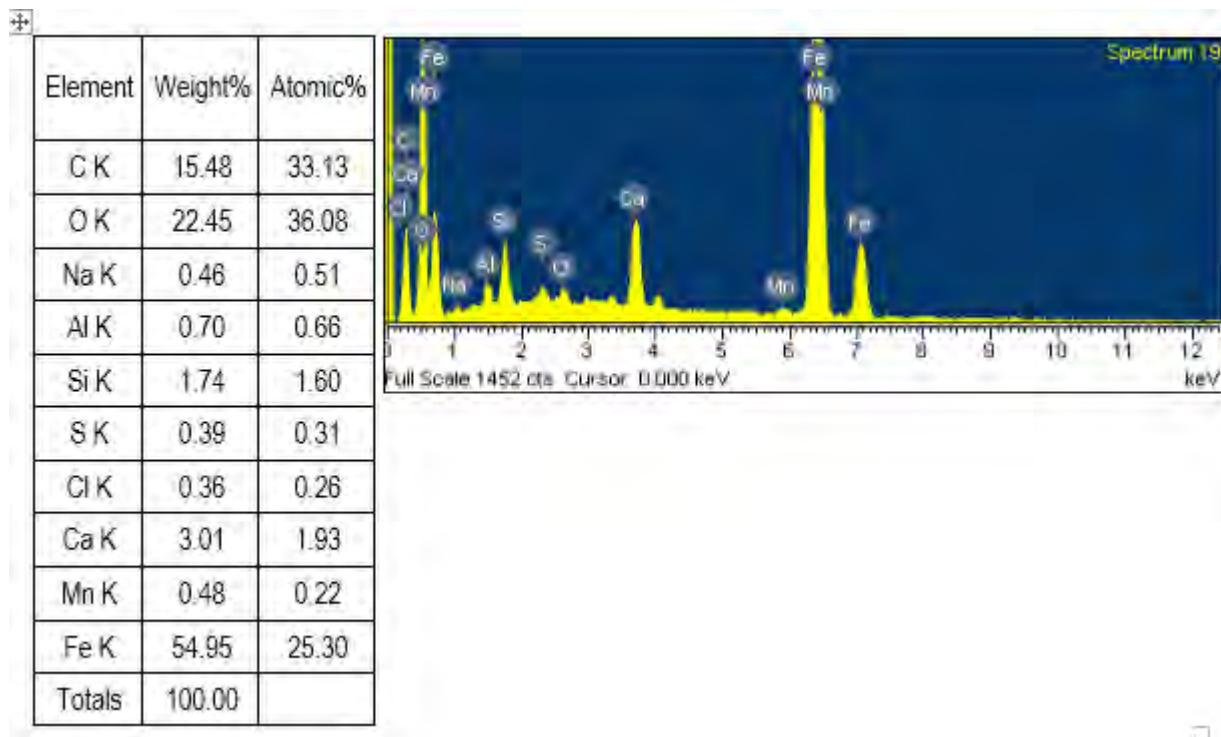


Figura 5.12. Microanálisis muestra B8 seco. Fuente: elaboración propia.

El análisis EDAX evidencia cloro sólo en una de las muestras, alcanzando un porcentaje de 0.36%. La concentración de oxígeno (22.4-32 %) representa valores típicos de los compuestos del concreto y se presentan en menor proporción que en la muestra A, indicando carencia de productos de corrosión del acero. El cloro detectado es por difusión a nivel del concreto.

5.3.6 Análisis muestra de acero de probeta B8 con limpieza con ultrasonido (B8_{ultra})

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta B8 (68 días de inmersión) limpia con ultrasonido.

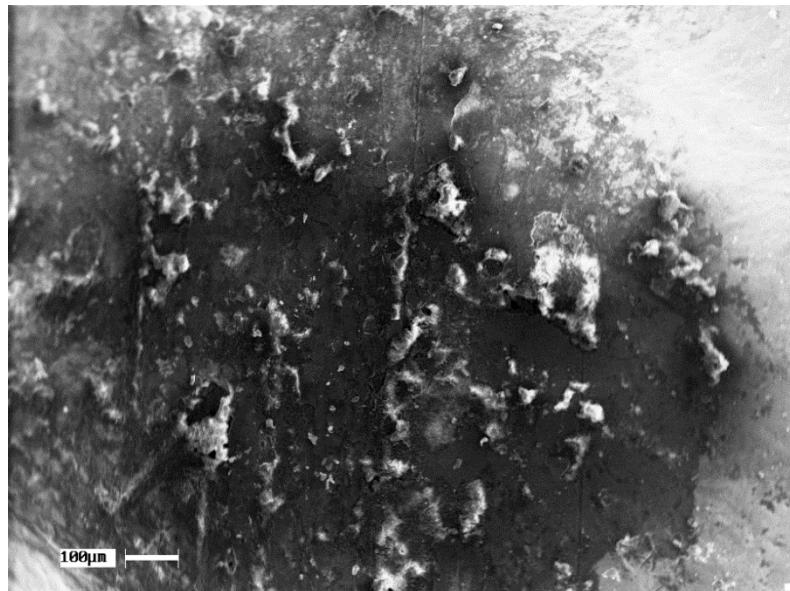
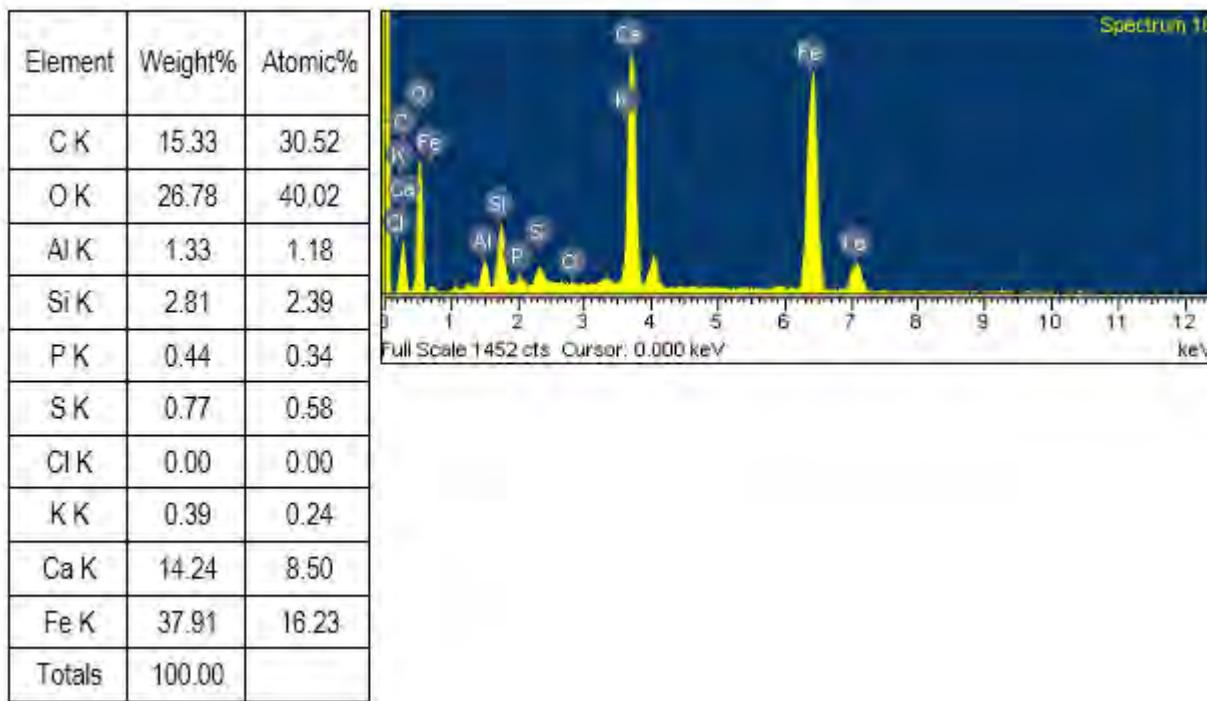


Figura 5.13. Muestra de acero B8_{ultra} con microscopía electrónica de barrido (100 μm). Fuente: Elaboración propia.

La morfología superficie muestra en sólo una de las imágenes (100 μm) pequeñas áreas de acero no cubiertas por el concreto y no se aprecia algún efecto de corrosión en dichas zonas. El resto superficie se encuentra cubierta con residuos de hormigón.

Figura 5.14. Microanálisis muestra B8_{ultra}. Fuente: elaboración propia.

El análisis EDAX no detecta la presencia de cloro en superficie de acero ni en residuos de concreto. Los principales elementos detectados son los constituyentes del concreto descritos anteriormente en las otras muestras. Los valores de oxígeno están en el rango composicional de los compuestos del concreto (dicálcico, tricálcicos, aluminatos, silicatos, etc.). Un incremento del oxígeno se puede asociar a productos de corrosión, pero en esta muestra no se evidencia su existencia.

5.3.7 Análisis muestra de acero de probeta C8 con limpieza en seco. (C8_{seco})

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta C8 (68 días de inversión) limpiada en seco.

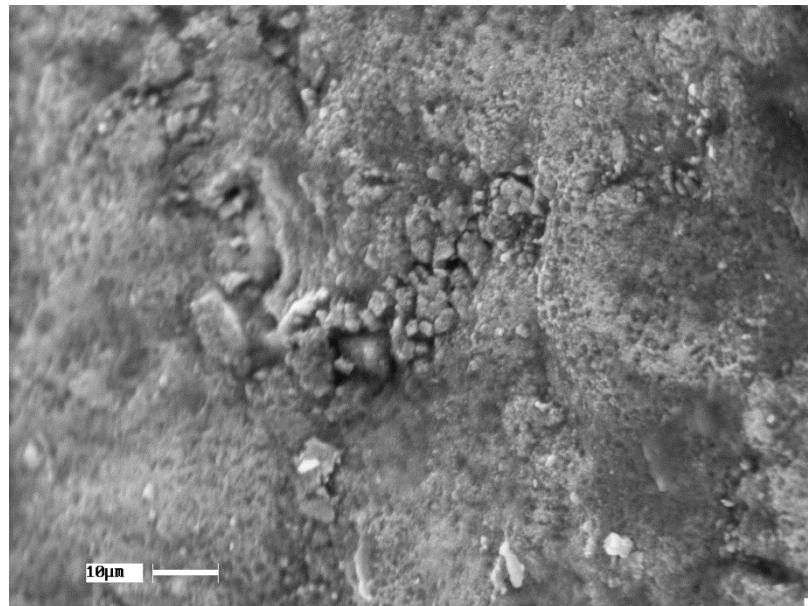
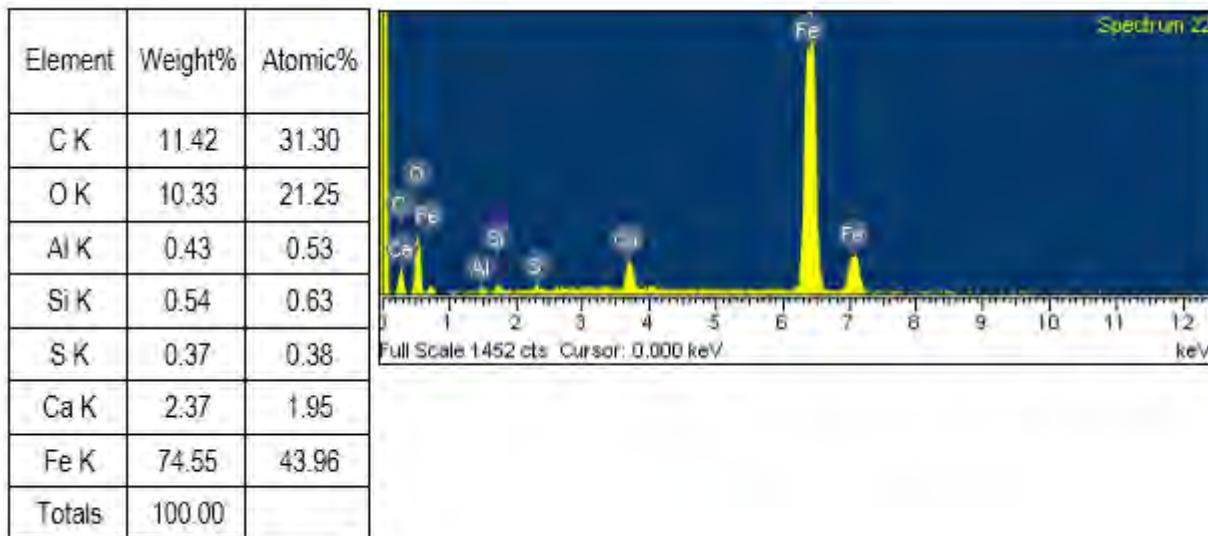


Figura 5.15. Muestra de acero C8_{seco} con microscopía electrónica de barrido (10μm). Fuente: Elaboración propia

Se observan residuos de concreto que cubren la superficie del acero por lo que no es posible ver su superficie. La morfología del concreto es dispersa, con distintos sustratos y espesores.

Figura 5.16. Microanálisis muestra C8_{seco}. Fuente: elaboración propia.

El análisis EDAX detecta concentraciones de Oxígeno que varían entre 10-27%, además de componentes del concreto (Ca, Si, S, Mg, K, Al.), lo que evidencia la presencia de residuos de concreto en distintos estados de conformación química (dicálcico, tricálcicos, aluminosilicatos, etc.).

5.3.8 Ánalysis muestra de acero de probeta C8 con limpieza con ultrasonido (C8_{ultra})

Muestra de acero de refuerzo correspondiente a la probeta C8 (68 días de inversión) limpiada con ultrasonido.

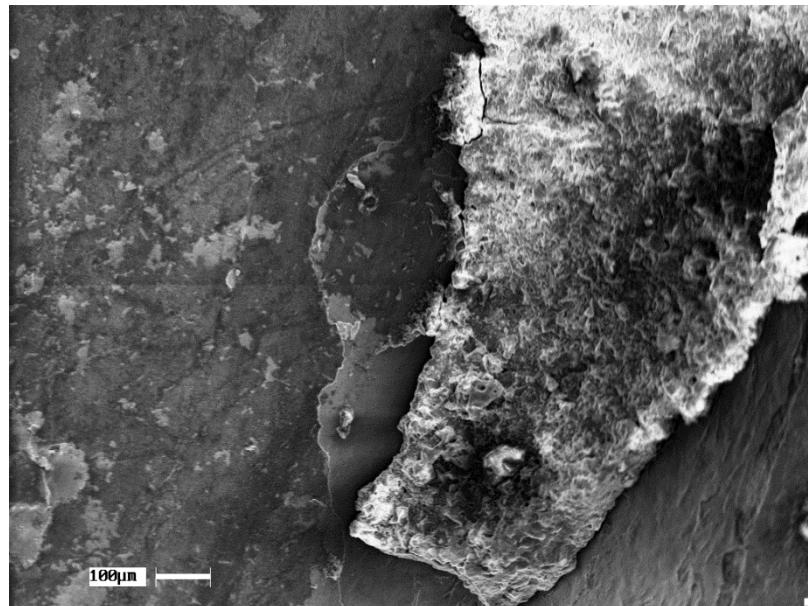
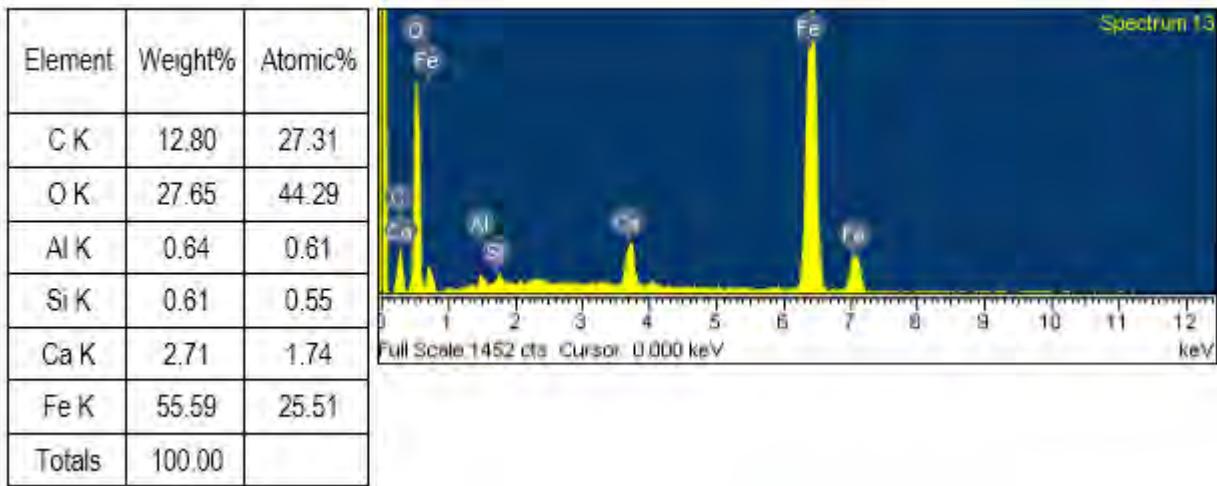


Figura 5.17. Muestra de acero C8_{ultra} con microscopía electrónica de barrido (10 μm). Fuente: Elaboración propia.

Se observan residuos de concreto que cubren la superficie del acero, estos son heterogéneos y con distintos grados de sustratos. No se detecta corrosión metálica.

Figura 5.18. Microanálisis muestra C8_{ultra}. Fuente: elaboración propia

El análisis EDAX muestra un incremento de estados de oxidación en un rango de 24-28% aprox., lo que podría corresponder a una evidencia de la existencia de productos de corrosión del acero bajo los residuos. Se detectan los mismos elementos químicos del concreto de la muestra C8_{seco}. No se evidencia presencia de cloro a nivel de residuos o sustratos de concreto superficial.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

A continuación se presentan los daños en la estructura metálica del hormigón armado por MEB, para las muestras preparadas con ultrasonido y expuestas 68 días.

Probeta	Fe/O	Cl %	Daño
Acero	1,24	0,39 %	Áreas de corrosión uniforme. Sin picadura.
Probeta A	0.09	0,50 %	Inicio corrosión uniforme. Sin picado
Probeta B	1,19	0 %	Sin picado
Probeta C	2,0	0 %	Sin picado

Tabla 5.2. Daño estructura metálica a los 68 días de inmersión, para muestras preparadas con ultrasonido. Fuente: Elaboración propia.

Se confirma que la difusión de iones cloruro es más significativa para el caso de las probetas A con la menor capa de recubrimiento protector.

En ningún caso se observa corrosión por picado, sí se detecta corrosión uniforme en diferentes etapas, para todas las probetas.

Si la superficie metálica se cubriera total y homogéneamente se debería detectar una razón Fe/O igual a 2,32 (relación para el Fe_2O_3). La probeta C, al cabo de 68 días, es la que más se acerca a este valor. La ausencia de iones cloruro permitiría la formación de la capa de óxido sin discontinuidades.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

Una estructura de hormigón armado, al estar expuesto a un ambiente agresivo, como lo es una fuente externa de cloruros, debe conservar su forma, calidad y serviciabilidad; por lo que es muy importante que sea bien proyectada, construida y conservada; respetando la normativa existente.

La medida de potencial electroquímico en el tiempo indica el grado de facilidad de transferencia de electrones entre el acero de refuerzo y el hormigón de las probetas. En general los valores obtenidos en los tres tipos de probetas evidencian una tendencia a ser más reactivos. Del estudio de las probetas clasificadas como muy buenas (MB) en la descripción visual realizada previamente, se observa que el potencial se hace más reactivo cuando aumenta el tiempo de exposición al medio agresivo y a medida que disminuye el recubrimiento protector del acero del hormigón.

Las concentraciones de cloruros alcanzan valores elevados desde la superficie del hormigón hasta una profundidad radial de 2 cm, luego decaen considerablemente. En las probetas A y B se obtienen valores más altos que en la probeta C a esta distancia, ya que al tener un mayor recubrimiento la calidad de éste es mejor. Se aprecia además una relación entre la descripción visual del estado superficial del recubrimiento, realizada a las probetas post curado, y las concentraciones de cloruro obtenidas. Para las probetas clasificadas como MB, el avance del ión cloruro se incrementa con el tiempo y disminuye en la medida que se aleja de la superficie del hormigón. Los espesores de recubrimiento de 3,25 cm y 5 cm son efectivos en detener el avance para los 68 días.

En el centímetro más próximo al acero de las probetas A (recubrimiento 2 cm) se registra una concentración máxima de 5471 ppm de cloruros, casi 10 veces mayor que para las probetas tipo B (recubrimiento 3,25 cm) cuyo valor más desfavorable es de 550 ppm, indicando que ampliar el recubrimiento en 1,25 cm significó otorgar una protección significativamente mayor al acero. Al analizar las probetas C en profundidades cercanas al refuerzo, se registran concentraciones equivalentes al tiempo 0 de inmersión.

La variación de concentración de la solución de inmersión concuerda con las concentraciones de cloruro obtenidas de las probetas, presentando diferencias entre 1,48 gr y 4,11 gr. Esta diferencia es esperable, debido al comportamiento no homogéneo del hormigón, por lo que las muestras de polvo en ocasiones no representan

la totalidad de la probeta. Además, el cloruro libre disuelto en el agua que contiene los poros puede movilizarse a través de su estructura, produciendo concentraciones mayores en la parte inferior de la probeta, por lo que la toma de muestras a la altura del acero no representa su totalidad.

El estudio de microscopía electrónica de barrido detecta corrosión uniforme en distintas etapas para todas las muestras analizadas (68 días); en ningún caso se observa corrosión por picado y se obtienen porcentajes de cloro sólo en el acero sin hormigón y en la probeta A. En la muestra de acero expuesta sin hormigón se observan áreas de corrosión uniforme, mientras que en el acero de la probeta A8 se observa el inicio de esta corrosión, demostrando que 2 cm de recubrimiento son insuficientes para otorgar una protección al acero. Esta comparación además evidencia que para observar en la barra de acero signos de corrosión localizada, se requiere un mayor tiempo de exposición por inmersión en la solución de NaCl.

En trabajos de titulación anteriores sólo se utilizaron probetas del tipo C (5 cm de recubrimiento), obteniendo valores de concentración de cloruro entre los 3 y 4 cm de profundidad de alrededor de 1200 ppm, a diferencia de esta investigación en la que se obtienen en las mismas condiciones concentraciones equivalentes al tiempo 0 de inmersión. Esto ocurre producto que anteriormente se utilizó hormigón con una resistencia a la compresión inferior (200 kg/cm^2), una relación agua-cemento superior (0,55) y un tamaño máximo de árido superior (40 mm), comprobando que variando estos factores de forma positiva se otorga una protección significativa a las estructuras.

Finalmente, de este estudio se desprende que para una estructura construida con un determinado tipo de hormigón, el espesor y calidad del recubrimiento son los factores más determinantes para otorgar una protección al acero expuesto a una fuente externa de cloruros por inmersión. Además, utilizando la resistencia a la compresión y relación agua-cemento especificada en la normativa vigente para esta clase de exposición, se pueden disminuir considerablemente los problemas de durabilidad producto de la corrosión del acero de refuerzo del hormigón armado.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para futuras investigaciones resulta interesante analizar el comportamiento de las probetas de menor diámetro (A y B), con las mismas características del hormigón, pero adicionando algún componente que busque otorgar una menor permeabilidad. De esta forma se podrían obtener resultados a corto plazo del efecto protector que se le otorgue al acero, ya que si el procedimiento es aplicado a las probetas de menor tamaño y se produce un efecto positivo, con mayor razón funcionará para recubrimientos mayores.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE, C. 2013. Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión. Revista ALCONPAT Vol 3: 82-101.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 2001. Guía para la durabilidad del hormigón. Reporte ACI Comité 201.2R. Estados Unidos. 59 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 2008. Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. ACI 318S-08. Estados Unidos. 518 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 2001. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Reported ACI committee 222R-01. Estados Unidos. 41 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). 1996. Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of the service life of Building Components and Materials. Designation ASTM E 632-82. Estados Unidos. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). 1993. *Terminology relating to corrosion and corrosion testing*. ASTM G15. Estados Unidos. 5p.

BERMÚDEZ O., M.A. 2007. Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: Zona de carreras de mareas y zona sumergida. Tesis Dr. Ing. Cam. Can. y Puertos. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid. 544 p.

CARRANZA, R.; G. DUFFO; S. FARINA. 2009. Nada es para siempre, Química de la degradación de los materiales. Buenos Aires, Instituto Nacional de Educación Tecnológica. 180p.

CARVAJAL, A. ; F. LAMBERT. 2006. Durabilidad de estructuras portuarias de hormigón armado en Chile. Análisis de tipos de protección superficial. Revista de la construcción PUC Vol.5 N°1: 36-44.

CASTAÑEDA, A. ; N. DIAZ ; E. GONZALES. 2005. Influencia de la penetración de iones cloruros en el hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición. Revista CENIC. Ciencias Químicas. Vol.36 N° especial.

CERNA V., M. 2010. Vida útil de estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material. Tesis Ing. Civil. Peru, Universidad privada Antenor Orrego. 86p.

CHANG, R.; W. COLLEGE. 2002. Química. 7 ed. McGraw-Hill. 1001p.

D'Andréa, R. 2010. Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica. Tesis Dr. Ing. Cam. Can. y Puertos. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid. 544 p.

FERNANDEZ, L. 2012. La durabilidad del hormigón: Su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos. Buenos Aires, Instituto del Cemento Portland Argentino. 41p.

FLORES S., M. 2012. Efecto protector de la nanosílice frente a la acción combinada de iones sulfato y cloruro en el hormigón armado. Tesis Ing. Civil en Obras Civiles. Valdivia, Universidad Austral de Chile. 130p.

GAIBOR, A.; A. VALDIVIESO, 2005. Análisis de puesta a tierra de primarios urbanos de 22.8 kV y 6.3 kV de la EEQ S.A. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico. Quito, Escuela Politécnica Nacional. 254p-

GUZMAN, S ; J. GALVEZ ; J. SANCHO. 2007. Figuración del hormigón por corrosión de las armaduras pasivas inducida por cloruros. Anales de la Mecánica de fracturas Vol.2. 8p.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES (IECA). 2013. Guías técnicas: Hormigón en ambiente marino. España. 16 p.

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE (IMT). 2001. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación técnica N°182. Ciudad de México. 88p.

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO (IMCYC). 2003. Corrosión del acero del refuerzo. (disponible en: <http://www.imcyc.com/revistacyt/oct11/artinengineria.html>). Consultado el: 7 de febrero de 2014).

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1979. Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales. NCh 163.Of79. Santiago, Chile. 29p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1985. Hormigón – Requisitos generales. NCh 170.Of85. Santiago, Chile. 65p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1975. Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. NCh 1017. Santiago, Chile. 15p

MEHTA, P.K. 1991. Durability of Concrete – Fifty Years of Progress?. ACI SP-126. Vol. I: 1-30.

MEHTA, P.K.; P. MONTEIRO. 1986. Concrete. Structure, Properties and Materials. Ed. Prentice Hall. 239p.

MOLINA P., L. 2009. Estudio avanzado de la corrosión. Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. 106p.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA). 2005. CIP25 – Corrosión del acero en el concreto. (disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP25es.pdf>). Consultado el: 6 de marzo de 2014).

PÉREZ M., L.R. 2010. Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión. Tesis Mag. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid. 124 p.

PUJADAS A., P. 2008. Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno. Tesis Dr. Ing. Cam. Can. y Puertos. España, Universidad politécnica de Cataluña. 122p.

RAZAQPUR, A.; O. ISGOR, 2009. Prediction of reinforcement corrosion in concrete structures. En: CHEN, S.; ANG, A., eds. Frontier Technologies for Infrastructures Engineering. Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema. Pp. 45 – 68.

SANDBERG, P. 1998. Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete. Suecia, Lund Institute of Technology. 115p.

SAURA G., P. 2011. Inhibidores en el inicio y propagación del proceso de corrosión de las armaduras en el hormigón armado. Tesis Dr. Ing. de los materiales, el agua y el terreno. Alicante, Univ. De Alicante. 311 p.

SCHIESSL, P. (1984). Protection of reinforcement. Comite Euro-Internacional du beton CEB, Boletín N°152, Durability of concrete structures. 241-297 p.

TORRENT, R. 2011. Deterioro prematuro de estructuras de hormigón. Causas principales y consecuencias socio-económicas. Curso de posgrado: Vida útil de estructuras de hormigón. 34p.

TUUTTI, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. 468p.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO (UAM). 2010. Fuerza electromotriz y potencial estándar. (disponible en:

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FUERZAELECTROMOTRIZYPOTENCIAESTANDAR_22644.pdf. Consultado el: 8 de abril de 2014).

VERA, R. ; J. ROMÁN ; M. PUENTES. 2013. Efecto de la difusión de ion cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado. Revista de la construcción PUC Vol 12 N°1: 30-40.

VIDAUD, E. 2013. Fisuras en el concreto ¿Síntoma o enfermedad? Construcción y tecnología en el concreto: 20-24.

VILLARREAL, E. 1971. Fuentes electroquímicas de corriente. México, ed. Limusa Wiley. 133p.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

8.1 ANEXO A: CLASES DE CONCRETO CATEGORIZADO SEGÚN APLICACIÓN

A continuación se presentan las clases de concreto categorizados según su aplicación (Figura 8.1).

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
F Congelamiento y deshielo	No es aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad	
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO_4) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO_4) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	$\text{SO}_4 < 0.10$	$\text{SO}_4 < 150$
	Moderada	S1	$0.10 \leq \text{SO}_4 < 0.20$	$150 \leq \text{SO}_4 < 1500$ agua marina
	Severa	S2	$0.20 \leq \text{SO}_4 \leq 2.00$	$1500 \leq \text{SO}_4 \leq 10000$
	Muy severa	S3	$\text{SO}_4 > 2.00$	$\text{SO}_4 > 10000$
P Requiere baja permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	
C Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

Figura 8.1. Categorías y clases de exposición. Fuente: ACI 318S. (2008).

A continuación se presentan los requisitos para el concreto según la clase de exposición.

TABLA 4.3.1 — REQUISITOS PARA EL CONCRETO SEGÚN LA CLASE DE EXPOSICIÓN²

Clase de Exposición	Rel. a/mc máx.	f'_c min. MPa	Requisitos mínimos adicionales			Limites en los cimentantes
Contenido de aire						
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0.45	31	tabla 4.4.1			N/A
F2	0.45	31	tabla 4.4.1			N/A
F3	0.45	31	tabla 4.4.1			tabla 4.4.2
Tipos de material cementante*			Aditivo cloruro de calcio			
				ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.50	28	II [†]	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V [‡]	IP(HS), IS(<70) (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31	V puzolanas o escoria [§]	IP(HS) y puzolanas o escoria [§] o IS(<70) (HS) y puzolanas o escoria [§]	HS y puzolanas o escoria [§]	No se permite
P0	N/A	17	Ninguna			
P1	0.50	28	Ninguna			
Contenido máximo de iones de cloruro (Cl ⁻) soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento			Requisitos relacionados			
C0	N/A	17	1.00	0.06		
C1	N/A	17	0.30	0.06		
C2	0.40	35	0.15	0.06	7.7.6, 18.16 [¶]	

*Se pueden permitir combinaciones alternativas de materiales cementantes diferentes a los mencionados en la tabla 4.3.1 siempre que sean ensayados para comprobar la resistencia a los sulfatos y deben cumplirse los criterios de 4.5.1.

[†]Para exposición al agua marina, se permiten otros tipos de cemento portland con contenidos de hasta 10 por ciento de aluminato tricalcico (C₃A) si la relación a/mc no excede 0.40.

[‡]Se permiten otros tipos de cemento como el tipo III o tipo I en exposiciones clase S1 o S2 si el contenido de C₃A es menor al 8 ó 5 por ciento, respectivamente.

[§]La cantidad de la fuente específica de puzolana o escoria que se debe usar no debe ser inferior a la cantidad que haya sido determinada por experiencia en mejorar la resistencia a sulfatos cuando se usa en concretos que contienen cemento tipo V. De manera alternativa, la cantidad de la fuente específica de puzolana o escoria que se debe usar no debe ser menor a la cantidad ensayada según la ASTM C1012 y debe cumplir con los requisitos de 4.5.1.

[¶]El contenido de iones cloruro solubles en agua provenientes de los ingredientes incluyendo el agua, agregados, materiales cementantes y aditivos de la mezclas de concreto, deben ser determinados según los requisitos de la ASTM C1218M, a edades que van de 28 a 42 días.

[¶]Se deben cumplir los requisitos de 7.7.5 véase 18.16 para tendones de preesfuerzo no adheridos

[¶]Para concreto liviano véase 4.1.2

Figura 8.2. Requisitos para el concreto según la clase de exposición. Fuente: ACI 318S. (2008).

8.2 ANEXO B: CONCENTRACIÓN DE Cl⁻ (PPM)

A continuación se presentan los cálculos realizados para obtener la concentración de Cl⁻ de la totalidad de las probetas.

Probeta	Radio	Peso muestra (gr)	vol AgNO ₃ (ml)	Molar Cl ⁻	PCI- en 50 ml de muestra filtrada (mg)	Ppm de NaCl en muestra filtrada
C0	1 cm	1,71	0,2	0,00008	0,234	136,8421053
C0	2cm	1,8	0,2	0,00008	0,234	130
C0	3cm	1,95	0,2	0,00008	0,234	120
C0	4cm	1,81	0,1	0,00004	0,117	64,64088398
A1	1 cm	1,35	5,4	0,00216	6,318	4680
A1	2 cm	2,01	2,3	0,00092	2,691	1338,80597
B1	1 cm	2,08	7,4	0,00296	8,658	4162,5
B1	2 cm	1,57	2,1	0,00084	2,457	1564,968153
B1	3 cm	1,77	0,3	0,00012	0,351	198,3050847
C1	1 cm	1,56	4,8	0,00192	5,616	3600
C1	2 cm	2,59	0,5	0,0002	0,585	225,8687259
C1	3 cm	1,78	0,1	0,00004	0,117	65,73033708
C1	4 cm	1,6	0,2	0,00008	0,234	146,25
A2	1 cm	1,31	6,9	0,00276	8,073	6162,59542
A2	2 cm	1,91	5	0,002	5,85	3062,827225
B2	1 cm	1,97	9,5	0,0038	11,115	5642,13198
B2	2 cm	1,87	2,8	0,00112	3,276	1751,871658
B2	3 cm	1,75	0,3	0,00012	0,351	200,5714286
C2	1 cm	1,53	6,8	0,00272	7,956	5200
C2	2 cm	1,92	2,1	0,00084	2,457	1279,6875
C2	3 cm	1,95	0,2	0,00008	0,234	120
C2	4 cm	1,8	0,2	0,00008	0,234	130
A3	1 cm	1,4	7,7	0,00308	9,009	6435
A3	2 cm	2,3	4,1	0,00164	4,797	2085,652174
B3	1 cm	1,95	7,6	0,00304	8,892	4560
B3	2 cm	1	1,5	0,0006	1,755	1755
B3	3 cm	1,74	0,4	0,00016	0,468	268,9655172
C3	1 cm	1,35	7,1	0,00284	8,307	6153,333333
C3	2 cm	2,11	1,9	0,00076	2,223	1053,554502
C3	3 cm	2,01	0,3	0,00012	0,351	174,6268657
C3	4 cm	1,62	0,2	0,00008	0,234	144,4444444
A4	1 cm	1,81	11,4	0,00456	13,338	7369,060773
A4	2 cm	1,48	2,5	0,001	2,925	1976,351351

Tabla B.1 continuación en página siguiente

Continuación Tabla B.1.						
Probeta	Radio	Peso muestra (gr)	vol AgNO3 (ml)	Molar Cl-	PCI- en 50 ml de muestra filtrada (mg)	Ppm de NaCl en muestra filtrada
B4	1 cm	1,47	9	0,0036	10,53	7163,265306
B4	2 cm	1,87	4,5	0,0018	5,265	2815,508021
B4	3 cm	1,96	0,3	0,00012	0,351	179,0816327
C4	1 cm	1,46	9,1	0,00364	10,647	7292,465753
C4	2 cm	1,98	5,3	0,00212	6,201	3131,818182
C4	3 cm	1,68	0,3	0,00012	0,351	208,9285714
C4	4 cm	1,92	0,2	0,00008	0,234	121,875
A5	1 cm	1,32	10,8	0,00432	12,636	9572,727273
A5	2 cm	2,15	5,9	0,00236	6,903	3210,697674
B5	1 cm	1,3	10,6	0,00424	12,402	9540
B5	2 cm	1,77	6,9	0,00276	8,073	4561,016949
B5	3 cm	2,31	0,5	0,0002	0,585	253,2467532
C5	1 cm	1,96	10,5	0,0042	12,285	6267,857143
C5	2 cm	1,9	2,9	0,00116	3,393	1785,789474
C5	3 cm	2,41	0,4	0,00016	0,468	194,1908714
C5	4 cm	1,84	0,6	0,00024	0,702	381,5217391
A6	1 cm	1,82	15,6	0,00624	18,252	10028,57143
A6	2 cm	1,98	7,6	0,00304	8,892	4490,909091
B6	1 cm	1,97	16	0,0064	18,72	9502,538071
B6	2 cm	2,11	7,1	0,00284	8,307	3936,966825
B6	3 cm	1,88	0,3	0,00012	0,351	186,7021277
C6	1 cm	1,74	12,6	0,00504	14,742	8472,413793
C6	2 cm	2,36	3,5	0,0014	4,095	1735,169492
C6	3 cm	1,82	0,3	0,00012	0,351	192,8571429
C6	4 cm	1,76	0,2	0,00008	0,234	132,9545455
A7	1 cm	1,81	17,5	0,007	20,475	11312,1547
A7	2 cm	1,39	6,5	0,0026	7,605	5471,223022
B7	1 cm	1,8	17,7	0,00708	20,709	11505
B7	2 cm	1,69	6,6	0,00264	7,722	4569,230769
B7	3 cm	1,68	0,7	0,00028	0,819	487,5
C7	1 cm	1,82	16,3	0,00652	19,071	10478,57143
C7	2 cm	1,85	3,8	0,00152	4,446	2403,243243
C7	3 cm	1,71	0,3	0,00012	0,351	205,2631579
C7	4 cm	1,93	0,3	0,00012	0,351	181,865285
A8	1 cm	1,65	13	0,0052	15,21	9218,181818
A8	2 cm	1,43	4,5	0,0018	5,265	3681,818182
B8	1 cm	1,59	17,8	0,00712	20,826	13098,11321
B8	2 cm	2,02	7,1	0,00284	8,307	4112,376238
B8	3 cm	1,39	0,6	0,00024	0,702	505,0359712

Tabla B.1 Continuación en página siguiente

Continuación Tabla B.1.						
Probeta	Radio	Peso muestra (gr)	vol AgNO3 (ml)	Molar Cl-	PCI- en 50 ml de muestra filtrada (mg)	Ppm de NaCl en muestra filtrada
C8	1 cm	1,8	15,3	0,00612	17,901	9945
C8	2 cm	2,02	4,5	0,0018	5,265	2606,435644
C8	3 cm	1,65	0,6	0,00024	0,702	425,4545455
C8	4 cm	2,13	0,2	0,00008	0,234	109,8591549

Tabla 8.1. Cálculo de concentración de Cl- de la totalidad de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

8.3 ANEXO C: CÁLCULO VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE INMERSIÓN

A continuación se presentan los cálculos realizados para obtener la variación de la concentración de la solución de NaCl.

- Gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión

Cubeta	Inicial			Final			g/L NaCl	gr en 20 litros
	Vol AgNO3 (ml)	Molar Cl-	gr/L NaCl inicial	Vol AgNO3 (ml)	Molar Cl-	g/L NaCl final		
1	24,6	0,605529	35,42344	23,4	0,575991	33,6954735	1,727973	34,55946
2	24,8	0,610452	35,7114	23,1	0,568606	33,2634803	2,44796175	48,959235
3	24,8	0,610452	35,7114	23,1	0,568606	33,2634803	2,44796175	48,959235
4	24,5	0,603067	35,27944	22,1	0,543991	31,8235028	3,455946	69,11892
5	24,6	0,605529	35,42344	21,9	0,539068	31,5355073	3,88793925	77,758785
6	24,9	0,612913	35,85543	22,2	0,546453	31,9675005	3,88793925	77,758785
7	24,5	0,603067	35,27944	21,1	0,519376	30,3835253	4,8959235	97,91847
8	24,3	0,598144	34,99145	20,7	0,509530	29,8075343	5,183919	103,67838

Tabla 8.2. gr de NaCl perdidos en la solución de inmersión. Fuente: Elaboración propia.

- Gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas

Cubeta	Probetas	ppm	gr	gr absorbidos
1	A1	6018,80597	4,32150269	33,0779975
	B1	5925,77324	11,5552578	
	C1	4037,84906	17,201237	
2	A2	9225,42264	6,62385346	52,7888436
	B2	8972,57507	17,4965214	
	C2	6729,6875	28,6684688	
3	A3	8520,65217	6,11782826	51,017147
	B3	6583,96552	12,8387328	
	C3	7525,95915	32,060586	
4	A4	9345,41212	6,71000591	72,3344959
	B4	10157,855	19,8078172	
	C4	10755,0875	45,8166728	
5	A5	12783,4249	9,17849911	73,9303836
	B5	14354,2637	27,9908142	
	C5	8629,35923	36,7610703	
6	A6	14519,4805	10,424987	81,8683533
	B6	13626,207	26,5711037	
	C6	10533,395	44,8722626	
7	A7	16783,3777	12,0504652	100,871538
	B7	16561,7308	32,295375	
	C7	13268,9431	56,5256977	
8	A8	12900	9,2622	99,5570268
	B8	17715,5254	34,5452746	
	C8	13086,7493	55,7495522	

Tabla 8.3. gr de NaCl absorbidos por cada trío de probetas. Fuente: Elaboración propia.

- Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión.

cubeta	gr absorbidos	gr perdidos	gr diferencia
1	33,07799751	34,55946	-1,48146249
2	52,78884359	48,959235	3,82960859
3	51,01714698	48,959235	2,05791198
4	72,33449586	69,11892	3,21557586
5	73,93038364	77,758785	-3,82840136
6	81,86835329	77,758785	4,10956829
7	100,8715379	97,91847	2,95306787
8	99,55702677	103,67838	-4,12135323

Tabla 8.4. Diferencia entre gr absorbidos por las probetas y gr perdidos en la solución de inmersión. Fuente: Elaboración propia.