

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES DE MACROCELDA EN
LA CORROSIÓN DE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EDIFICACIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN



AUTORA

ERIKA JULIANA PACHECO GARCIA

TUTOR

DR. JOSÉ MANUEL GANDÍA ROMERO

COTUTOR

JOSEP RAMON LLISO FERRANDO

VALENCIA, JULIO 2021



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Juliana Pacheco García

Trabajo Fin de Máster



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a mis formadores, personas de gran sabiduría; al director de este proyecto, el Dr. José Manuel Gandía Romero, por confiar en mí para desarrollar este trabajo investigador, por su apoyo y colaboración durante este enriquecedor proceso de aprendizaje. También al codirector de este Trabajo Final de Máster, Josep R. Lliso Ferrando, por compartir conmigo sus conocimientos, por su paciencia, orientación y guía. Sin su ayuda no habría sido posible culminar con éxito esta importante etapa académica de mi vida.

Gracias a mi familia por confiar y creer en mí y en mis expectativas, por ser el motor de mi vida. A mi madre por ser mi mayor ejemplo de fortaleza y valentía, y a mi hermana por despertar en mí el amor por la academia y la disciplina. Gracias a las dos por cuidar de mí, animarme siempre a cumplir mis sueños, apoyarme, y brindarme incondicionalmente su más sincero amor. Ustedes representan la felicidad de mi vida.

A mis amigos en España, infinitas gracias por su empatía, acogida, compañía, comprensión y aliento para terminar este proceso educativo. Siempre estaré agradecida con la vida por rodearme de personas tan maravillosas y amables como ustedes.

De igual forma, doy infinitas gracias a todas aquellas personas que directa e indirectamente contribuyeron con la culminación de esta meta, gracias por su tiempo, sus consejos y palabras de aliento.

Por último, pero no menos importante, doy gracias a Dios, por guiar siempre mi vida y por regalarme cada día la bendición de crecer y ser mejor persona.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Juliana Pacheco García

Trabajo Fin de Máster



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Juliana Pacheco García

Trabajo Fin de Máster



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

En memoria de

H. Julio Pacheco



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Juliana Pacheco García

Trabajo Fin de Máster



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

RESUMEN

En la actualidad, el deterioro de las estructuras de hormigón armado debido a la corrosión es un problema de gran importancia en todo el mundo. Las consecuencias del desarrollo de este fenómeno llevan asociados sobrecostes de inspección y mantenimiento, la disminución de su vida útil, deterioros estéticos e importantes impactos medioambientales. Éstas son razones más que suficientes para fomentar el diseño y desarrollo de sistemas integrados de monitorización de la corrosión que permitan definir estrategias de evaluación y mantenimiento adecuados garantizando la seguridad y reduciendo costes.

La corrosión es un fenómeno electroquímico que se manifiesta de múltiples maneras en los elementos metálicos. En este trabajo se analizará la corrosión de las armaduras embebidas en hormigón y se prestará especial atención a las corrientes de macrocelda: se analizará la influencia de la ratio cátodo-ánodo y, además, se estudiará como influye al analizar la corrosión total de las armaduras.

Para lograr el cometido descrito anteriormente, se fabricaron dos losas de hormigón armado 80cmx32cmx11cm, con diferentes sensores embebidos. El diseño de cada una de las piezas se realizó con armaduras aisladas eléctricamente y con cableado al exterior, permitiendo controlar a voluntad la configuración de la macrocelda. Durante más de 200 días se realizó un seguimiento de la corrosión de los sensores embebidos que se dividió en tres etapas: (a) sistema pasivo; (b) exposición parcial a cloruros; y (c) diferentes configuraciones de macrocelda.

A raíz de los resultados obtenidos se pudo cuantificar el valor real de las corrientes de macrocelda y su importancia en los procesos de corrosión total. Además, se plantea una nueva configuración de sensor embebido que considere este fenómeno en los procesos de monitorización y seguimiento de este proceso electroquímico.

ABSTRACT

Nowadays, the deterioration of reinforced concrete structures due to corrosion represents a problem of vast significance worldwide. The consequences of this phenomenon are primarily associated with the increment of costs associated with the inspection and maintenance of these structures, along with a decrease in the durability of buildings. Furthermore, the aesthetic deterioration of the structural elements and the significant environmental impact also play an important role. These are reasons to encourage the design and development of integrated corrosion monitoring systems. They can be used in new or existing reinforced concrete structures, employing tools and methods that provide outstanding safety and precision.

Corrosion is an electrochemical phenomenon that manifests itself in many ways in metallic elements. This work will go over corrosion in concrete embedded reinforcements dwelling upon macrocell currents. It will be analyzed the influence of the cathode-anode ratio and the impact of this phenomenon on the total amount of the rebar's corrosion.

To achieve the above-mentioned tasks, two 80cmx32cmx11cm reinforced concrete slabs were manufactured, where several sensors were embedded. The design of each of the pieces was made with electrically isolated reinforcements with an electrical connection, allowing control of the macrocell configuration. The sensors embedded were monitored for more than 200 days. This period was divided into three stages: (a) passive system; (b) partial exposure to chlorides; and (c) different macrocell configurations. As a result, it was possible to quantify the real value of the macrocell currents and their importance in the total corrosion processes. Moreover, a new embedded sensor configuration is proposed that considers this phenomenon in the monitoring and follow-up processes of this electrochemical process.

RESUM

En l'actualitat, la deterioració de les estructures de formigó armat degut a la corrosió és un problema de gran importància a tot el món. Les conseqüències del desenvolupament d'aquest fenomen porten associats sobrecostos d'inspecció i manteniment, la disminució de la seua vida útil, deterioracions estètiques i importants impactes mediambientals. Aquestes són raons més que suficients per a fomentar el disseny i desenvolupament de sistemes integrats de monitoratge de la corrosió que permeten definir estratègies d'avaluació i manteniment adequats garantint la seguretat i reduint costos.

La corrosió és un fenomen electroquímic que es manifesta de múltiples maneres en els elements metàl·lics. En aquest treball s'analitzarà la corrosió de les armadures embegudes en formigó i es prestarà especial atenció als corrents de macrocel·la: s'analitzarà la influència de la ràtio càtode-ànode i, a més, s'estudiarà com influeix en analitzar la corrosió total de les armadures.

Per a aconseguir la comesa descrita anteriorment, es van fabricar dues lloses de formigó armat *80cmx32cmx11cm, amb diferents sensors embeguts. El disseny de cadascuna de les peces es va realitzar amb armadures aïllades elèctricament i amb cablejat a l'exterior, permetent controlar a voluntat la configuració de la macrocel·la. Durant més de 200 dies es va realitzar un seguiment de la corrosió dels sensors embeguts que es va dividir en tres etapes: (a) sistema passiu; (b) exposició parcial a clorurs; i (c) diferents configuracions de macrocel·la.

Arran dels resultats obtinguts es va poder quantificar el valor real dels corrents de macrocel·la i la seua importància en els processos de corrosió total. A més, es planteja una nova configuració de sensor embegut que considere aquest fenomen en els processos de monitoratge i seguiment d'aquest procés electroquímic.



CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo principal	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2. METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	7
2.1 CORROSIÓN	7
2.2 TIPOS DE CORROSIÓN	9
2.3 CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO	12
2.4 PROCESO ELECTROQUÍMICO DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO	14
2.4.1 Pila electroquímica	14
2.4.2 Potencial estándar de reducción	17
2.4.3 Diagrama de Pourbaix	19
2.4.4 Agentes despasivantes precursores de la corrosión	21
2.4.4.1 Cloruros	21
2.4.4.2 Carbonatación	23
2.4.5 Diagrama de Tuutti	25
2.5 TIPOS DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO	26
2.5.1 Microcelda	26
2.5.2 Macroceda	27
2.5.3 Ecuaciones de Butler-Volmer	28
2.6 TÉCNICAS DE MEDIDA DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO ..	33
2.6.1 Técnicas cualitativas	34
2.6.2 Técnicas cuantitativas	37
CAPÍTULO 3: PLAN EXPERIMENTAL	49
3.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO	49
3.2 LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN	50
3.2.1 Proceso de fabricación	52
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	58
3.3.1 Dosificación	58
3.3.2 Hormigonado	58
3.4. TRABAJOS PREVIOS A LAS MEDIDAS DE CORROSIÓN	61



3.4.1. Acondicionamiento de la losa	61
CAPÍTULO 4: MEDIDAS.....	63
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	63
4.2. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	65
4.2.1 Etapa 1.....	66
4.2.2 Etapa 2.....	70
4.2.3 Etapa 3.....	74
CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	77
5.1. RESULTADOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	77
5.1.1 Resistencia a compresión	77
5.1.2 Porosidad accesible al agua	78
5.1.3 Absorción por capilaridad	78
5.1.4 Coeficiente de difusión por migración	79
5.1.5 Síntesis de los resultados de caracterización.....	79
5.2. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	80
5.2.1 Etapa 1.....	81
5.2.2 Etapa 2.....	83
5.2.3 Etapa 3.....	85
5.2.4 Visión global del periodo de seguimiento: discusión.....	89
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	95
CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	97
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....	99

IMÁGENES

Imagen Nº 1: Corrosión severa de las armaduras de una viga	7
Imagen Nº 2: Esquema de una celda de corrosión electroquímica	8
Imagen Nº 3: Corrosión por picadura.	9
Imagen Nº 4: Piezas metálicas de un puente corroídas por la acción mecánica de las cargas. 10	
Imagen Nº 5: Cables de acero tensados y anclados al hormigón con presencia de corrosión. . 10	
Imagen Nº 6: Tubería con corrosión interna por erosión.....	11
Imagen Nº 7: Corrosión intergranular en un acero inoxidable austenítico.....	11
Imagen Nº 8: Manchas de óxido en superficie.....	12
Imagen Nº 9: Muelle con armaduras visibles como consecuencia del desprendimiento del recubrimiento.....	13
Imagen Nº 10: Celda electroquímica	15
Imagen Nº 11: Proceso de corrosión por macrocelda en hormigón reforzado.....	16
Imagen Nº 12: Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25°C	20
Imagen Nº 13: Ataque localizado ocasionado por cloruros sobre superficie de una armadura . 23	
Imagen Nº 14: Revelado de carbonatación con fenoftaleína.	24
Imagen Nº 15: Diagrama de Tutti. Etapas de iniciación y propagación	25
Imagen Nº 16: Microestructura del acero de armaduras	26
Imagen Nº 17: Comportamiento de microcelda, en trozo de acero	27
Imagen Nº 18: Proceso de corrosión en muro de contención en zona portuaria.	28
Imagen Nº 19: Sistema electroquímico sin conexión eléctrica	29
Imagen Nº 20: Sistemas electroquímicos independientes de barras de acero activas y pasivas. Densidades de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) Vs potencial (mV vs. SCE).	31
Imagen Nº 21: Sistema electroquímico con conexión eléctrica	32
Imagen Nº 22: Sistemas electroquímicos acoplado de barras de acero activas y pasivas. Intensidades de corriente (microA) Vs potencial (mV/SCE).	32
Imagen Nº 23: Montaje E_{CORR}	35
Imagen Nº 24: Montaje resistividad en el laboratorio.....	36
Imagen Nº 25: Curvas de polarización de Tafel.....	38
Imagen Nº 26: Secuencia básica de escalones de potencial para ensayo de PSV.	41
Imagen Nº 27: Secuencia de pulsos potencioestáticos para la aplicación del método PSV.....	41
Imagen Nº 28: Respuesta de la Intensidad ante el tren de pulsos.....	42
Imagen Nº 29: Circuito equivalente mixto (Farádico – no Farádico).....	43
Imagen Nº 30: Curva de polarización con puntos de secuencia de potencial de PSV.....	44
Imagen Nº 31: Esquema del sensor de monitorización de la corrosión.....	46
Imagen Nº 32: mecanismo de funcionamiento del sensor	47
Imagen Nº 33: Distribución de elementos dentro del sistema de monitorización de losas de hormigón armado.....	51
Imagen Nº 34: Fabricación de conexiones eléctricas para armaduras.....	52
Imagen Nº 35: Dimensiones de sensor tipo.....	53
Imagen Nº 36: Fabricación de sensores	54
Imagen Nº 37: Disposición de armaduras en tablero de encofrado.....	54
Imagen Nº 38: Planta y perfil de prototipos de ensayo.	55
Imagen Nº 39: Losas de hormigón en encofrado metálico.....	56
Imagen Nº 40: Impresión 3D de soportes para sensores.....	56
Imagen Nº 41: Vista en perfil de la ubicación de los sensores.	57
Imagen Nº 42: Actividades previas al hormigonado.....	59
Imagen Nº 43: Procedimiento de amasado.	60
Imagen Nº 44: Fotografía losas de hormigón armado en laboratorio de electroquímica.....	61



Imagen Nº 45. Ensayo de resistencia a la compresión.....	63
Imagen Nº 46. Ensayo de absorción de agua, densidad y porosidad	64
Imagen Nº 47. Ensayo de absorción de agua por capilaridad.....	64
Imagen Nº 48. Ensayo de migración de cloruros.....	65
Imagen Nº 49. Configuración sensores. Losa 1, S1 y S2, losa 2, S3 y S4.....	66
Imagen Nº 50. Conexiones entre niveles de armadura y sensor 2 ó 4.....	67
Imagen Nº 51. Medida de la intensidad de macrocelda con amperímetro de resistencia casi nula (ZRA).....	68
Imagen Nº 52. Conexiones ensayo PSV medida de i_{local} etapa 1.....	69
Imagen Nº 53. Conexiones ensayo PSV medida de i_{local} etapa 2.....	70
Imagen Nº 54. Fotografías corte de tuberías de PVC.....	71
Imagen Nº 55. Fotografías de la limpieza de losa para garantizar adherencia de ponding de tuberías de PVC.....	71
Imagen Nº 56. Fotografías corte de tuberías de PVC.....	72
Imagen Nº 57. Ponding con concentración de cloruros.....	73
Imagen Nº 58. Electrodo de referencia, conexión a las losas etapa 1 y etapa 2.....	74
Imagen Nº 59. Electrodo de referencia, conexión a las losas.....	76
Imagen Nº 60. Evolución de la resistencia a compresión.....	77
Imagen Nº 61. Comportamiento de la porosidad en el tiempo	78
Imagen Nº 62. Planta y perfil de sensores en la losa.....	80
Imagen Nº 63. Potencial de corrosión E_{CORR} en le etapa 1	81
Imagen Nº 64. Intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ en la etapa 1.....	82
Imagen Nº 65. Intensidad de corrosión por macrocelda $i_{CORR,macro}$ en la etapa 1.....	82
Imagen Nº 66. Potencial de corrosión E_{CORR} en le etapa 2	84
Imagen Nº 67. Intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ en la etapa 2.....	84
Imagen Nº 68. Conexiones semanales de macrocelda	86
Imagen Nº 69. Potencial de corrosión E_{CORR} en le etapa 3	86
Imagen Nº 70. Intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ en la etapa 3.....	87
Imagen Nº 71. Intensidad de corrosión por macrocelda $i_{CORR,macro}$ en la etapa 3.....	87
Imagen Nº 72. Evolución de intensidad de corrosión por macrocelda $i_{CORR,macro}$ por semana..	89
Imagen Nº 73. Intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ completo.....	90
Imagen Nº 74. Intensidad de corrosión i_{CORR}	90
Imagen Nº 75. Valores de la corrosión por macrocelda y corrosión total.....	92
Imagen Nº 76. Porcentaje de la corriente de macorcelda sobre la corrosión total.....	92
Imagen Nº 77. Propuesta modelo de mejora sistema INESSCOM.....	96
Imagen Nº 78. Modelado de las macroceldas en las losas realizados con herramientas informáticas.	97



TABLAS

Tabla 1: Potenciales de reducción estándar en disolución acuosa.....	18
Tabla 2: Clasificación del riesgo de corrosión según ATSM C-876.	35
Tabla 3: Grado de corrosión por resistividad	37
Tabla 4: Dosificación del hormigón	58
Tabla 5: Muestras para ensayos de caracterización.	60
Tabla 6: Relación de cátodo/ánodo etapa 1	66
Tabla 7: Relación de cátodo/ánodo etapa 2	75
Tabla 8: Resultados absorción por capilaridad.	78
Tabla 9: Coeficientes de difusión obtenidos a partir del test de migración	79
Tabla 10: Resumen de resultados.....	79
Tabla 11: Nomenclatura sensores.....	80
Tabla 12: Criterio de evaluación de la probabilidad de corrosión.....	83



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La utilización del acero como refuerzo del hormigón comienza en el año 1830; su incorporación en el mundo de la ingeniería quedó documentado en el texto titulado "Enciclopedia de la arquitectura de casas de campo, granjas y aldeas" (UPCT Escuela de Ingeniería técnica civil, 2007). A partir de esta fecha, no ha cesado la labor de investigadores y técnicos en la búsqueda de avances que mejoren las propiedades mecánicas de este material. Otro de los objetivos de estos trabajos de investigación es el de comprender aquellos fenómenos que desencadenan el deterioro prematuro del hormigón armado y terminan por destruir la integridad de estas estructuras y reducir su vida útil, afectando indirectamente a la economía y sostenibilidad de la sociedad actual. La principal causa de deterioro de las estructuras de hormigón armado es la corrosión, proceso electroquímico sobre el que se fundamenta esta investigación.

La corrosión de las armaduras de refuerzo en las estructuras de hormigón armado es una afección que se produce en la mayoría de las construcciones de este tipo a lo largo de su vida útil. La probabilidad de que este fenómeno se produzca aumenta cuando las estructuras se encuentran expuestas a ambientes agresivos como el medio marino, donde el ion cloro puede difundir hasta las armaduras y desencadenar la aparición de estos procesos. El fenómeno de la corrosión también está condicionado por los componentes utilizados para la fabricación del hormigón, la dosificación utilizada, y factores externos como la temperatura o la humedad.

Otro de los datos que no puede obviarse es la repercusión económica de este fenómeno, ya que las últimas estadísticas hacen referencia a pérdidas con un coste en torno al 3% anual del PIB en los países desarrollados (AMPP, 2021). Se trata de cifras alarmantes, las cuales ponen de relevancia la necesidad de estudio y control de los procesos de corrosión.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el fenómeno de la corrosión es un daño que no puede ser olvidado. Los métodos de análisis más utilizados en estructuras de hormigón armado están basados en la inspección visual y en técnicas cualitativas. También se pueden utilizar sistemas de medida in situ. Sin embargo, la problemática originada por la accesibilidad y la dificultad para realizar seguimientos a largo plazo por cuestiones técnicas y económicas han hecho que se promueva la utilización de sistemas de monitorización y seguimiento remoto. En los últimos años se han desarrollado sistemas de sensores embebidos capaces de proporcionar información en tiempo real, donde destaca el sistema INESSCOM (Integrated Network System for Corrosion Monitoring) desarrollado y patentado por los investigadores del laboratorio de electroquímica de la ETSIE-UPV.

El presente trabajo se centra en el estudio de la corrosión en las estructuras de hormigón armado, y profundiza en la influencia de las corrientes de macrocelda en dicho proceso, con la finalidad de justificar la necesidad de considerarlas en el sistema de medida empleado por la herramienta de monitorización INESSCOM.

El plan experimental de este estudio comprende la monitorización de sensores embebidos en dos losas de hormigón armado expuestas parcialmente al ataque por cloruros. La configuración de armado y el método de exposición propuestos favorecerá que aparezcan corrientes de macrocelda, con lo que se espera determinar de manera precisa la influencia que tienen en los procesos de corrosión en un caso real.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Analizar la influencia de las corrientes de macrocelda en la corrosión local y total de las armaduras de refuerzo en las estructuras de hormigón armado, y poder así, determinar la importancia de su monitorización.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía existente sobre los procesos de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón, estudiando la corrosión generada por las corrientes de macrocelda.
- Diseñar un modelo de probeta que permita evaluar de forma controlada el fenómeno de las corrientes de macrocelda en el hormigón armado
- Determinar mediante ensayos normalizados las propiedades físico relacionadas con la durabilidad del material y los procesos de corrosión de las armaduras.
- Determinar las corrientes de corrosión local ($i_{CORR,local}$) de las armaduras embebidas en hormigón, mediante su monitorización. Analizar los parámetros electroquímicos del fenómeno de la corrosión que aporten información sobre este proceso.
- Determinar las corrientes de macrocelda ($i_{CORR,macro}$).
- Valorar la influencia de la relación de superficies anódica y catódica en las corrientes de macrocelda.



- Valorar la influencia de las corrientes de macrocelda en la corrosión total (i_{CORR}).

1.2. METODOLOGÍA

Para poder llevar a cabo este trabajo y cumplir los objetivos planteados, inicialmente se realizará una revisión bibliográfica para conocer el estado del arte actual respecto a la corrosión y más concretamente, al caso de las macroceldas. Tras este primer análisis, se diseñará un plan experimental para estudiar este fenómeno de primera mano, el cual se llevará cabo mediante la monitorización de losas de hormigón armado a escala. Tras el periodo de seguimiento de más de 200 días se procederá al análisis de la información obtenida para extraer una serie de conclusiones que permitan mejorar la comprensión de las corrientes de macrocelda en los procesos de corrosión de las estructuras de hormigón armado.

A continuación, se detalla la metodología seguida dividida por capítulos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

En este apartado se expone brevemente el tema principal del presente trabajo, dando a conocer las pautas generales que justifican la investigación. Se describen los objetivos principales y específicos y el alcance al que se pretende llegar.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Este apartado recoge la revisión bibliográfica que afecta a esta investigación. Se estudian brevemente los fundamentos necesarios para comprender la corrosión en el hormigón armado. Se presenta también el desarrollo teórico de las corrientes de macrocelda en las estructuras de hormigón. Se revisan los principales métodos de medida y monitorización de la corrosión de las armaduras embebidas en hormigón y la consideración que tienen de las corrientes de macrocelda.

CAPÍTULO 3

PLAN EXPERIMENTAL

Se describe detalladamente la fabricación de 2 losas de hormigón armado a escala. Se definen los sensores utilizados, el proceso de elaboración seguido para su manufactura, y se presenta la dosificación empleada.

CAPÍTULO 4

MEDIDAS

Se detallan las medidas llevadas a cabo para la caracterización del hormigón, poniendo especial énfasis en las propiedades relacionadas con la durabilidad del material y la corrosión de las armaduras.

Se enumeran las medidas realizadas para la monitorización de los procesos de corrosión local ($i_{CORR,local}$) y por macrocelda ($i_{CORR,macro}$) de los sensores embebidos en las losas de hormigón armado.

Se detallan, una vez ejecutados los ensayos, el tratamiento de los datos, las fórmulas y metodologías implementadas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del material y de la monitorización llevada a cabo sobre las losas de hormigón armado a escala.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se presentan las principales conclusiones extraídas.

CAPITULO 7

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

A tenor de las dimensiones que posee la investigación de la corrosión en las estructuras de hormigón armado y en concreto, en el ámbito de las corrientes de macrocelda, se propone una continuación del plan de trabajo llevado a cabo en esta investigación.

CAPITULO 8

BIBLIOGRAFIA

Recoge el conjunto de referencias bibliográficas consultadas a lo largo del trabajo.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se definen una serie conceptos básicos que permitirán comprender el fenómeno de la corrosión en las estructuras de hormigón armado, poniendo especial atención sobre las corrientes de macrocelda.

2.1 CORROSIÓN

La corrosión es un proceso natural en el que el metal tiende a volver a su estado original. En la naturaleza, los metales se encuentran en estado oxidado ya que es su forma más estable, y, a través de un proceso industrial, son transformados en el acero que comúnmente conocemos. Este acero industrial se encuentra en un estado metaestable, en el que se le han retirado los óxidos, pero su tendencia natural siempre va a ser volver a su estado original, es decir, combinado con óxidos.

La norma española UNE-EN ISO 8044:2020 define este concepto como “la interacción fisicoquímica entre un material metálico y su entorno, que conlleva a modificaciones en las propiedades del metal, y que pueden conducir a una degradación significativa de la fundición del metal, del medio ambiente o del sistema técnico del que forma parte” (UNE, 2020)



Imagen Nº 1:Corrosión severa de las armaduras de una viga

Fuente: ronacrete.co.uk

La mayoría de los autores indican que los procesos de corrosión pueden manifestarse mediante mecanismos de corrosión química o seca, o mediante mecanismos de corrosión electroquímica o húmeda. (Pazos Peinado, 2006)

La corrosión química o seca es un tipo de reacción que se produce en ausencia de electrolito (en ambientes gaseosos) y a elevadas temperaturas. Esto permite que se forme entorno a la pieza metálica una película sólida de productos

de reacción, con lo que la circulación de iones y electrones se produce a través de esta capa, ocasionando un ataque generalizado. (Gonzalez, 1984)

La corrosión electroquímica o húmeda surge en presencia de un electrolito (disolución) a temperaturas moderadas y bajo el principio de las pilas electroquímicas. En este caso se diferencian en el metal dos regiones, una región anódica y otra catódica. En la región anódica se produce la oxidación, y en la región catódica se genera la reducción del oxígeno, como se observa en la imagen N°2. La circulación de carga negativa se produce a través del metal. Para cerrar dicho circuito debe existir un electrolito que permita la circulación de iones, en este caso el agua. (Fernández Domene, Sánchez Tovar, Lucas Granados, & García Anton, 2018)

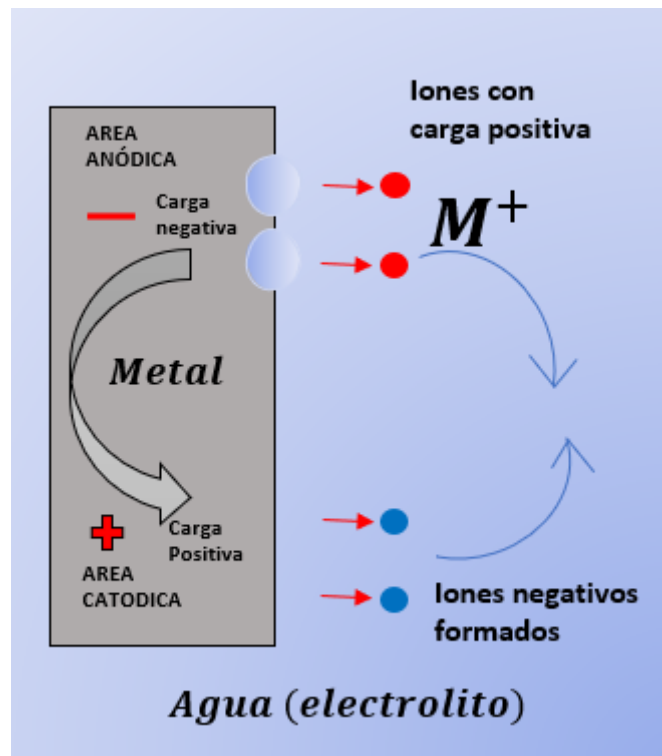


Imagen N° 2: Esquema de una celda de corrosión electroquímica

Fuente: Elaboración propia.

La corrosión electroquímica es un fenómeno que se produce internamente en las estructuras de hormigón armado. Esto se debe a que el conjunto de las armaduras se halla inmerso en un electrolito compuesto por la disolución de poro existente en la matriz del hormigón. Las diferentes regiones electroquímicas que se generan en el armado conducen a originar pilas electroquímicas.

Una vez comprendido el concepto general de corrosión y los mecanismos principales mediante los cuales se desarrolla este proceso, en el siguiente

apartado se expone una clasificación más detallada de los tipos de corrosión según su morfología.

2.2 TIPOS DE CORROSIÓN

Las categorías en las que se clasifica la corrosión según su morfología son:

- *Corrosión generalizada*: es el proceso más común en el que se presenta la corrosión, donde la oxidación se produce por igual en toda la superficie del metal. Se puede controlar con la elección de materiales adecuados o protecciones de alta eficacia. Este tipo de corrosión es habitual en estructuras de hormigón armado cuando el factor desencadenante es la Carbonatación del hormigón (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, 1991)
- *Corrosión galvánica o entre dos metales*: fenómeno originado por el contacto de dos metales distintos y con diferente estado electroquímico, sumergidos en la misma solución acuosa. En este caso, el metal menos noble es quien tiende a oxidarse. (Fernández Domene, Sánchez Tovar, Lucas Granados, & García Anton, 2018)
- *Corrosión por picadura*: el daño se genera en una zona puntual, lo que convierte este fenómeno en muy agresivo, causando graves defectos por la rápida pérdida de material en zonas muy concretas. Este tipo de corrosión se produce por defectos o impurezas de la aleación o por la presencia de aniones en determinadas regiones del metal. En el caso de estructuras la acción despasivante de los cloruros en ambientes marinos dan lugar a este tipo de procesos (Fajardo Panizo, 2013)



Imagen Nº 3: Corrosión por picadura.

Fuente: Elaboración propia

- Corrosión por desgaste: en este caso la corrosión se produce sobre metales sometidos a cargas, vibraciones o deslizamientos. El desgaste y la abrasión del metal ocasionan la formación de capas de óxido. (Gómez Botero, 2005)



Imagen Nº 4: Piezas metálicas de un puente corroídas por la acción mecánica de las cargas.

Fuente: (Acronautics Guide, 2020)

- Corrosión por esfuerzo o bajo tensión: daño común en metales activos, como las armaduras pretensadas y postensadas. Este tipo de corrosión genera grietas localizadas que ramifican, y bajo condiciones favorables de corrosión, como la presencia de cloruros, puede tener como consecuencia el fallo estructural.



Imagen Nº 5: Cables de acero tensados y anclados al hormigón con presencia de corrosión.

Fuente: (BECOSAN, 2021)

- Corrosión erosiva: desgaste mecánico de las piezas por procesos de abrasión. Intervienen dos factores principales, un medio corrosivo en movimiento que genera abrasión, y un material metálico. Ambos deben interactuar bajo un movimiento relativo. El ejemplo más común se presenta en tuberías donde circula agua a gran velocidad, de tal forma que la tubería está sometida constantemente a efectos corrosivos y de desgaste en forma simultánea. (Vásquez, 2018)



Imagen Nº 6: Tubería con corrosión interna por erosión.

Fuente: (Igp, 2006)

- Corrosión intergranular: fenómeno condicionado por las propiedades microestructurales del metal. En los procesos industriales los metales se mezclan para generar aleaciones que potencien sus propiedades, generando un elemento compuesto por un conglomerado de granos. Los límites entre los granos tienen características distintivas, entre ellos, mayor energía acumulada, lo cual vuelve el material propenso a sufrir corrosión selectiva localizada en los bordes de grano, ya que estos tienden a ser sensiblemente más reactivos que la matriz (Vásquez, 2018)

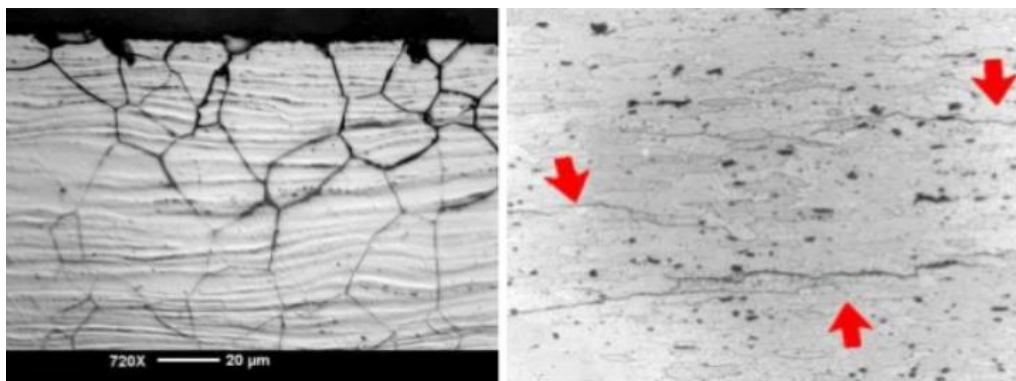


Imagen Nº 7: Corrosión intergranular en un acero inoxidable austenítico

Fuente: (Aguilar Schafer, 2017)

2.3 CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

La corrosión de las armaduras en el hormigón armado es un grave problema que acelera la degradación de las estructuras fabricadas con este material. Se considera uno de los factores principales que disminuyen la durabilidad y el ciclo de vida útil de las estructuras. (Amaya, Cornejo, & Rigail-Cedeno, 2018).

En consecuencia, la corrosión ocasiona altos costes por mantenimiento, reparación, y en el peor de los escenarios, sustitución. Estos costes se componen principalmente de gastos directos, donde se requiere cubrir expensas de mano de obra, tecnologías, productos de prevención, equipos de protección y recambios de elementos afectados. A todo esto, se deben añadir las pérdidas económicas indirectas, donde el simple hecho de no poder usar las edificaciones por reparación implica pérdidas monetarias importantes. (Castañeda & Rodríguez, 2014).

Otro de los problemas que produce la corrosión es el declive estético de los elementos estructurales. Las edificaciones, conforme avanza la corrosión, empiezan a evidenciar cambios como:

-manchas marrones que surgen a causa de la migración de óxido férrico al exterior (Sepúlveda, 2017) (ver imagen N°3);



Imagen N° 8: Manchas de óxido en superficie

Fuente: (Colegio de ingenieros industriales, 2021)

-fisuras originadas por las presiones internas que se generan cuando la capa de hierro corroído aumenta, (Rivas, 1977) (ver imagen N°4);

-y en el peor de los casos, desprendimientos del recubrimiento, los cuales se producen cuando las fisuras formadas en el exterior se ensanchan hasta mapear las superficies de hormigón. (COTECNO, 2021).

Estas afecciones estéticas conllevan también una importante pérdida de capacidad mecánica y, por tanto, de seguridad.



Imagen Nº 9: Muelle con armaduras visibles como consecuencia del desprendimiento del recubrimiento

Fuente: (Bukorovic , 2019)

Otro de los costes que lleva asociado el fenómeno de la corrosión es el impacto medioambiental que genera. El descenso de la vida útil y/o las reparaciones conllevan nuevos consumos de materias primas. No se puede obviar que la producción del hormigón es responsable del 4-8% de las emisiones mundiales de CO₂ y de consumir más del 1.7% de las extracciones de agua mundiales al año para su fabricación (Watts, 2019). Estos datos convierten a la industria del hormigón en una de principales causantes de la huella de carbono actual. Si no se utilizan políticas más restrictivas y ecológicas, la fabricación del hormigón por si solo pone en peligro el principal objetivo del acuerdo de París: “evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales” (Hirsch, 2018).

Para comprender la importancia del hormigón actualmente basta con indicar que, después del agua, el hormigón es la sustancia más utilizada en el planeta (Seguí, 2019). Tan solo en España, la producción de hormigón armado en el año 2019 aumentó un 10.5%, lo que equivale aproximadamente a un incremento de 2,6 millones de metros cúbicos más que en el año anterior, con un consumo anual total superior a las 15 toneladas (ANEFHOP, 2021).

Como consecuencia de todo lo citado anteriormente, el estudio de técnicas de monitorización de la corrosión en estructuras de hormigón armado que permitan detectar el fenómeno de manera prematura se ha convertido en una herramienta valiosa. Estos métodos permitirían la programación de inspecciones y operaciones de mantenimiento proactivas, es decir, más certeras y oportunas, permitiendo así controlar los problemas que conlleva el desarrollo del fenómeno de la corrosión, los cuales afectan directamente la seguridad de las estructuras, los costos y presupuestos de las obras y la salud ambiental del planeta.

Con el fin de entender el origen, la evolución, y el avance de los procesos de corrosión en estructuras de hormigón armado, a continuación, se describen las bases teóricas que fundamentan el comportamiento de este fenómeno.

2.4 PROCESO ELECTROQUÍMICO DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO

El fenómeno de corrosión que se produce a nivel interno en las estructuras de hormigón armado es un proceso electroquímico de destrucción del metal. Este daño puede conllevar pérdidas de sección importantes, pérdidas de adherencia acero-hormigón, y generar daños estructurales que comprometan gravemente la integridad de las construcciones.

A continuación, se explicarán los aspectos más importantes para poder comprender este fenómeno.

2.4.1 Pila electroquímica

La pila electroquímica es un sistema en el que se genera una intensidad de corriente como consecuencia de la conexión eléctrica de dos metales con distinto potencial electroquímico en un mismo electrolito.

Un ejemplo útil que permite explicar el proceso de corrosión es la pila electroquímica propuesta por Volta, donde interactúan entre sí, el cobre (Cu) y el Zinc (Zn). Cada uno de los elementos es el componente principal de una semicelda electroquímica, como se puede observar en la imagen N° 10. El cobre se encuentra en contacto con una solución de $CuSO_4$ y el zinc con una solución de $ZnSO_4$, ambas soluciones son compuestos químicos característicos de sales. (Kanematsu & Barry, 2016).

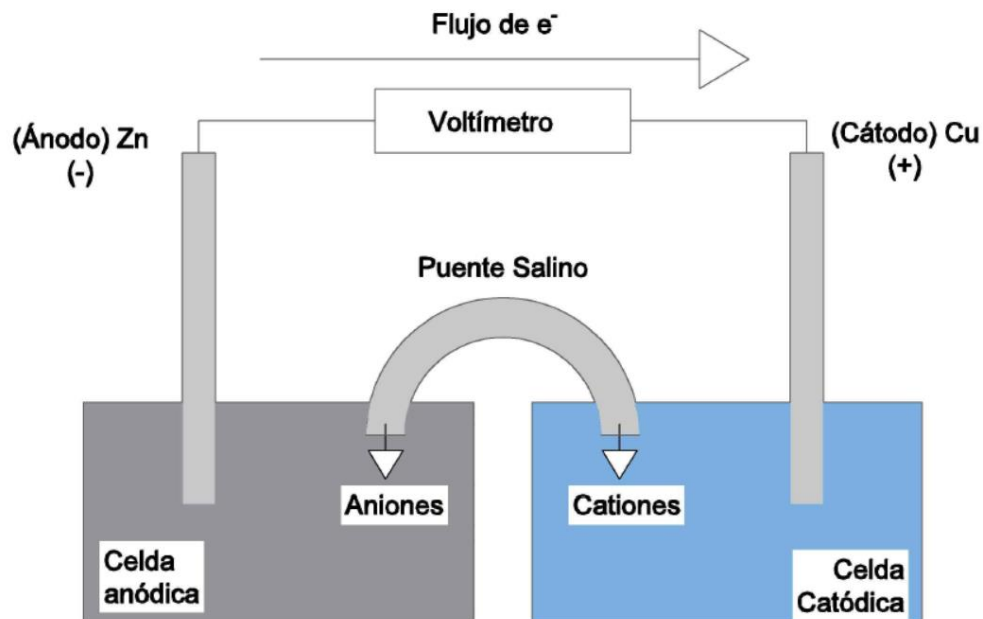


Imagen N° 10: Celda electroquímica

Fuente: Elaboración propia

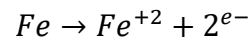
Ahora bien, las piezas metálicas que interactúan, es decir, el electrodo de cobre y el electrodo de zinc, se encuentran conectadas por un hilo conductor o circuito externo. Para cerrar el sistema la pila cuenta con un puente salino, el cual equipara las cargas eléctricas en ambas celdas, permitiendo el flujo de iones y evitando a su vez la mezcla de las soluciones. Esto quiere decir que, conforme sucede la reacción redox, los iones del puente salino emigran para neutralizar la carga en las semiceldas (Caselles Pomares, 2015).

Con el uso de un voltímetro puede leerse la diferencia de potencial entre los dos polos de la celda, ya que cada reacción sucede a un potencial electroquímico distinto (Gonzalez Muradás & Montagut Bosque, 2015).

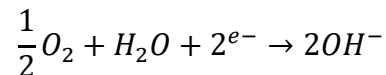
En la realidad, es difícil que se formen de manera natural pilas donde los metales que interactúan sean de diferente naturaleza y estén sumergidos en un electrolito, tal y como sucede en la pila galvánica de la imagen N° 10. El fenómeno más frecuente de pila electroquímica se produce para un mismo metal con regiones expuestas a un entorno electroquímico distinto. Este es el caso de las armaduras embebidas en hormigón, formándose en un mismo metal regiones que actúan como ánodos y cátodos.

A través de la descripción de la pila electroquímica se ha podido comprobar que el fenómeno de la corrosión corresponde a un proceso en el que se producen dos reacciones, definiendo así un proceso “redox”, con una doble reacción reducción-oxidación.

En el caso de las armaduras en hormigón, la reacción de oxidación corresponde al paso del hierro a su forma oxidada, con la pérdida de dos electrones:



Para que la reacción de oxidación se lleve a cabo, debe generarse en paralelo una reacción de reducción, que solicite dichos electrones liberados:



El conjunto de estas dos semirreacciones es la conocida reacción "redox", y surge gracias a la interacción de cuatro constituyentes fundamentales:

- la región anódica, lugar donde ocurre la oxidación y se liberan electrones;
- la región catódica, zona donde ocurre la reducción y se combinan dichos electrones;
- material conductor por el que los electrones se desplazan desde la región anódica a la catódica (la propia armadura);
- y un electrolito o disolución, que cumple la función de cerrar el circuito eléctrico, permitir la conducción iónica, y aportar agentes oxidantes.

A continuación, se muestra un esquema del proceso de corrosión que sufre una pieza de acero de refuerzo dentro de una matriz de hormigón cuando las condiciones son favorables para el desarrollo de la reacción electroquímica.

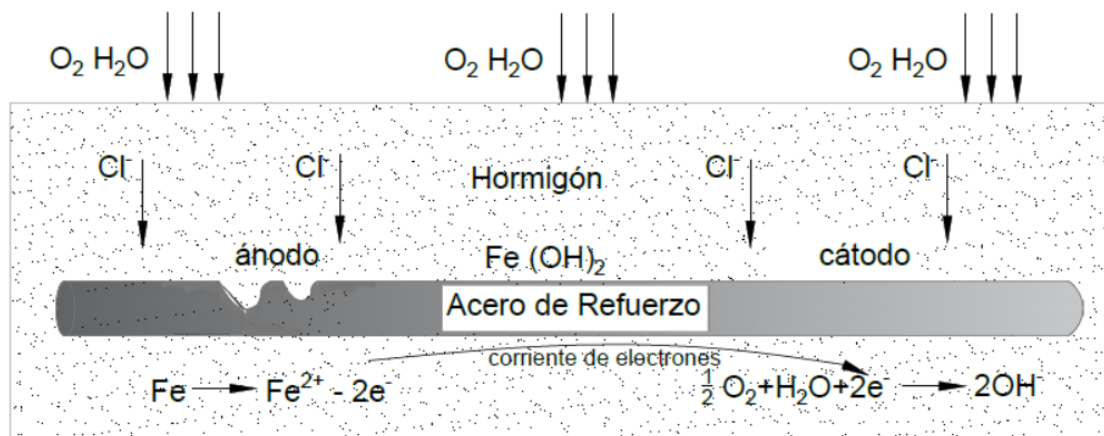


Imagen N° 11: Proceso de corrosión por macrocelda en hormigón reforzado

Fuente: Elaboración propia

Para poder comprender el origen del proceso reducción-oxidación de las armaduras, y teniendo en cuenta el ejemplo de la pila electroquímica propuesta por Volta, se debe comprender el concepto de potencial estándar de reducción.

2.4.2 Potencial estándar de reducción

El potencial estándar de reducción expresa la facilidad que posee un electrodo para perder electrones. Es importante tener claro que, aunque el modelo conceptual descompone una reacción redox en dos semirreacciones independientes, que ocurren en dos celdas separadas, la semicelda de oxidación y la semicelda de reducción, en realidad, no ocurren de forma aislada. (Licausi, 2017)


No obstante, basados teóricamente en lo anterior, se consideran dos potenciales parciales por separado, asignados cada uno a una semirreacción. Estos valores estandarizados para cada especie química fueron obtenidos a partir de medidas del voltaje de celdas reales, donde los elementos se comparaban con un electrodo de referencia. Por convenio se utiliza normalmente el electrodo normal de hidrogeno (ENH), aunque por su mayor robustez, en el campo de las medidas en hormigón armado se utiliza el electrodo de calomelanos saturados (SCE), cuyo potencial respecto al ENH está definido.

Es posible hablar singularmente del potencial de reducción y del potencial de oxidación, sin embargo, en la práctica, siempre que se desee expresar la diferencia de potencial de una reacción, en términos de las de sus semirreacciones, por convenio se suele usar el potencial de reducción del par redox o potencial mixto (González Luque, 2011).

En la actualidad existen tablas (tabla N°1) en la que se recogen los potenciales estándar de reducción y donde se clasifican una serie de elementos en función de su tendencia a la oxidación o a la reducción dentro un sistema electrolítico.

Tabla 1: Potenciales de reducción estándar en disolución acuosa

Semirreacción de reducción	$E^{\circ}(V)$	
$Li^{+} + e^{-} \rightarrow Li_{(s)}$	-3,040	+ REDUCTOR
$K^{+} + e^{-} \rightarrow K_{(s)}$	-2,924	
$Ca^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ca_{(s)}$	-2,869	
$Na^{+} + e^{-} \rightarrow Na_{(s)}$	-2,7144	
$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mg_{(s)}$	-2,3568	
$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al_{(s)}$	-1,676	
$Mn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mn_{(s)}$	-1,182	
$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}$	-0,828	
$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn_{(s)}$	-0,7621	
$Cr^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Cr_{(s)}$	-0,74	
$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Fe_{(s)}$	-0,440	
$Cr^{3+} + e^{-} \rightarrow Cr^{2+}_{(s)}$	-0,41	
$Cd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cd_{(s)}$	-0,40	
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni_{(s)}$	-0,236	
$Sn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Sn_{(s)}$	-0,14	
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pb_{(s)}$	-0,1266	
$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)}$	0,0000	
$Cu^{2+} + e^{-} \rightarrow Cu^{+}$	+0,160	
$SO_4^{2-} + 4H^{+} + 2e^{-} \rightarrow SO_{2(g)} + 2H_2O$	+0,17	
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu_{(s)}$	+0,3394	
$O_{2(g)} + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$	+0,414	
$Cu^{+} + e^{-} \rightarrow Cu_{(s)}$	+0,5180	
$I_{2(s)} + 2e^{-} \rightarrow 2I^{-}$	+0,535	
$MnO_4^{-} + 2H_2O + 3e^{-} \rightarrow MnO_{2(s)} + 4OH^{-}$	+0,597	
$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$	+0,769	
$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag_{(s)}$	+0,7991	
$NO_3^{-} + 4H^{+} + 3e^{-} \rightarrow NO_{(g)} + 2H_2O$	+0,96	

$Br_{2(l)} + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	+1,0775	
$2IO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightarrow I_{2(s)} + 6H_2O$	+1,2093	
$O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,2288	
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1,33	
$Cl_{2(g)} + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	+1,3601	
$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au_{(s)}$	+1,42	
$PbO_{2(s)} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	+1,458	
$ClO^- + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + H_2O$	+1,46	
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,5119	
$Au^+ + e^- \rightarrow Au_{(s)}$	+1,68	
$H_2O_{2(l)} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,77	
$F_{2(g)} + 2e^- \rightarrow 2F^-$	+2,890	

Fuente: (Cedrón, 2011)

Esta tabla permite predecir el comportamiento que desempeñará una especie dentro de una reacción electroquímica, asociando la capacidad catódica/reductora, a aquellos elementos más negativos en la tabla, y la capacidad anódica/oxidante a los elementos más positivos.

Aunque es posible hablar individualmente del potencial de reducción y del potencial de oxidación, en la práctica y para el caso del acero en estructuras de hormigón armado se suele expresar el potencial de la pieza como el conjunto de sus semirreacciones, utilizando el potencial mixto (González Luque, 2011).

2.4.3 Diagrama de Pourbaix

En 1938 el químico belga Marcel Pourbaix definió a través de sus investigaciones sobre las fases termodinámicas de los metales unas gráficas en las que se relaciona el pH de la solución acuosa en la que se encuentran con el potencial de corrosión. Estos diagramas indican la estabilidad del metal y establecen las condiciones en las que el material se corroe, se pasiva o permanece inmune. Las gráficas se dividen en tres zonas claramente (Cesáreo Gomez & Alcaraz Lorente, 2004):

- zona de inmunidad, donde el metal permanece en forma metálica;
- zona de corrosión, donde el metal pasa a una forma iónica;
- zona de pasivación, donde el metal forma capas de productos con el Oxígeno y el Hidrógeno, que podrían inhibir el proceso corrosivo.

Estos diagramas permiten predecir la generación espontánea de reacciones, estimar la estabilidad y la composición de los productos de corrosión, y conocer los cambios ambientales que puedan afectar a este fenómeno.

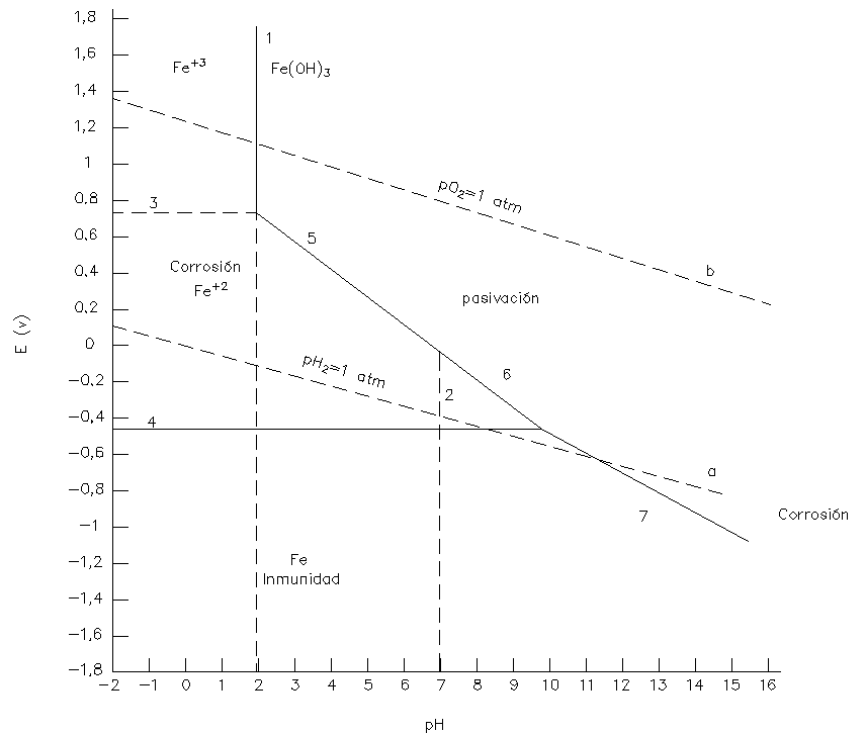


Imagen Nº 12: Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25°C

Fuente: (Bilurbina Alter, Liesa, & Iribarren Laco, 2003)

El diagrama que permite comprender el comportamiento de las armaduras embebidas en hormigón armado se muestra en la Imagen 12, el cual corresponde al comportamiento del hierro a 25°C. Este diagrama permite comprender que para que las armaduras embebidas en el hormigón sufran de procesos de corrosión, la interfaz acuosa debe tener un pH bajo, menor de 10.

Cuando el hierro se ubica en la zona de inmunidad, el metal no se corroe ya que no se dan las condiciones termodinámicas para ello. En este caso, en la zona definida como “pasivación”, los hidróxidos del hierro presentes en la disolución de poro del hormigón forman una capa superficial de protección imperceptible, de apenas varias micras de espesor y que se deposita en la interfaz acero-hormigón, y actúa como barrera química. Esta capa reduce la movilidad iónica, por lo que se elimina la posterior oxidación del elemento y se denomina capa pasiva. Esto sucede por lo general en la región de pH entre 12.5 y 13.5 (Fajardo, 2013).

Si estas condiciones de pH del medio se mantienen, las armaduras mantendrán su estado inicial y la corrosión no se iniciará. Sin embargo, esta capa

pasiva autorregenerable no es eterna, sino que bajo condiciones de pH más bajo (<9) puede desestabilizarse. Esta situación se puede alcanzar en el hormigón cuando se carbonata o por la acidificación de zonas puntuales de la armadura por la acción de los cloruros. Estos agentes despasivantes logran alcanzar las armaduras tras difundir a través de la matriz porosa del hormigón de la capa de recubrimiento de las armaduras.

En el siguiente apartado se definirán con más detalle la acción de los cloruros y del avance del frente de carbonatación en lo que respecta al inicio de la corrosión de las armaduras embebidas en hormigón.

2.4.4 Agentes despasivantes precursores de la corrosión

Inicialmente, y tal y como se ha descrito en apartados anteriores, el acero de las armaduras está protegido por dos barreras:

-barrera química, compuesta por la capa pasiva que se origina de forma natural sobre las armaduras;

-barrera física, compuesta por el recubrimiento de las armaduras (Fernandez Garcia, 2016).

En el apartado anterior se describió como la barrera química surge de manera natural, pero puede desaparecer bajo determinadas condiciones. Sin embargo, la barrera física es mucho más robusta, aunque con una gran permeabilidad. El recubrimiento de las armaduras es de hormigón, por tanto, presenta una porosidad que genera una alta permeabilidad al gas y al agua. Esta porosidad juega un papel clave en la durabilidad de las armaduras, ya que del recubrimiento depende el periodo de tiempo necesario para el inicio de la corrosión.

Los agentes despasivantes capaces de difundir a través de la matriz cementante y ocasionar la despasivación de las armaduras son los cloruros y la carbonatación desencadenando los procesos de corrosión.

2.4.4.1 Cloruros

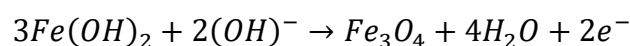
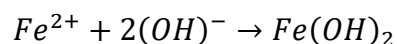
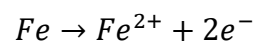
Los cloruros pueden ser introducidos en el hormigón durante el proceso de fabricación como consecuencia de la utilización de agua contaminada y áridos o aditivos con excesos del ion cloro. Sin embargo, la causa más frecuente de que los cloruros se encuentren dentro del hormigón es por la exposición a ambientes ricos en cloruros, como zonas marinas o lugares donde se utilicen sales de deshielo. La permeabilidad del hormigón permite que los cloruros difundan a través del recubrimiento hasta alcanzar las armaduras.

La velocidad de propagación de este agente dentro de hormigón armado se encuentra condicionada por la concentración de cloruros en el medio, la naturaleza del catión del ion cloruro, las propiedades del hormigón, la temperatura y la existencia de fisuras o patologías previas (Felix & Rodriguez, 2018). Además, la heterogeneidad del hormigón no permite que se genere un frente de avance uniforme, sino que los cloruros alcanzan de manera puntual las armaduras, lo que genera una corrosión localizada, denominada corrosión por picadura. Este fenómeno genera la despasivación del refuerzo en zonas muy puntuales y, como consecuencia, pérdidas de sección importantes en esas regiones al generarse pequeñas zonas que actúan como ánodo (Ramirez Cruz, 1994).

La destrucción del metal por la presencia de cloruros obedece a la formación de una macropila de corrosión, que se genera cuando los iones cloruro alcanzan la superficie de la armadura y forman complejos solubles con los iones de hierro, que luego se alejan de la zona anódica. El compuesto formado consume los iones de hierro libres en la solución y altera el equilibrio de la capa pasiva, por lo cual conforme aumenta la presencia de nuevos iones cloruro, aumenta la solubilidad de la capa pasiva. (Garces & Martínez, 2008)

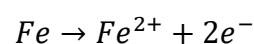
Este efecto catalítico aumenta en presencia de oxígeno, haciendo los compuestos de cloro inestables, acidificando la interfaz y liberando más cloruros, lo que concentra el ataque en la región de picadura que ahora actúa como ánodo, atrayendo aún más cloruros a esta área y proliferando el ataque (Fernandez Garcia, 2016). Este proceso de picadura se divide en tres fases: la fase de nucleación, la fase metaestable y la fase de crecimiento estable.

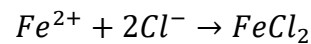
La fase de nucleación se desarrolla en aquellas zonas donde la capa pasiva es débil o imperfecta. Aquí los iones OH^- , tratan de regenerar la capa de óxido protector (Magnetita Fe_3O_4)



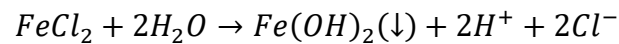
Este comportamiento de la capa pasiva favorece la adsorción de los cloruros en estas zonas, pues los cloruros desplazan a los hidroxilos iniciando el proceso autocatalítico de corrosión:

-primero los iones Cl^- reaccionan con los cationes Fe^{2+} que se habían generado en la disolución del metal.





-los complejos $FeCl_2$ se desplazan más allá de la picadura hasta llegar a zonas donde el PH es más alto, es aquí donde se disuelven y forman el hidróxido de hierro que al ser poco soluble acaba precipitando.



-de esta forma los cloruros son liberados nuevamente y se encuentran disponibles para atacar otra vez al metal. El exceso de carga positiva en el interior de la picadura, producto de la alta concentración de Fe^{2+} genera una fuerte atracción de más iones Cl^{-} , fomentando aún más el ataque. Esta etapa es conocida como la fase metaestable.

Para que el proceso continúe, y pasar así a la fase de crecimiento estable, se debe mantener en la interfaz acero-hormigón un pH bajo y una constante migración del ion Cl^{-} al interior de la picadura.

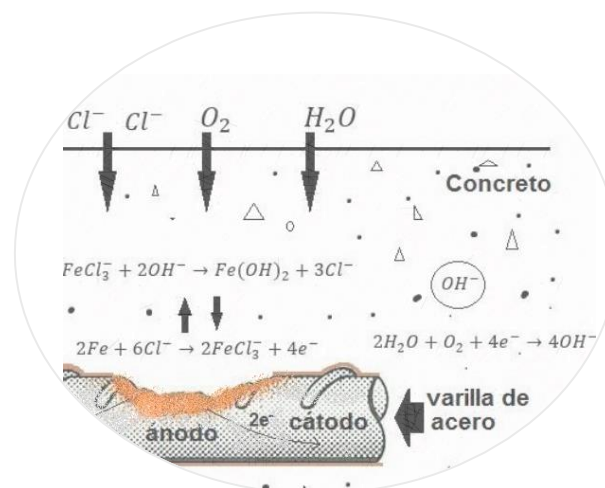
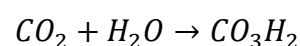


Imagen Nº 13: Ataque localizado ocasionado por cloruros sobre superficie de una armadura

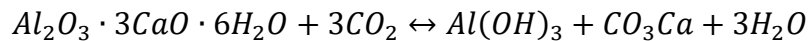
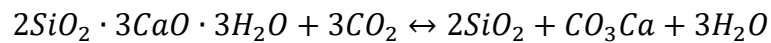
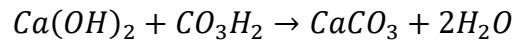
Fuente: (Rivera-Corral & Fajardo San Miguel, 2018)

2.4.4.2 Carbonatación

La carbonatación es un proceso por el que se produce una reducción de la alcalinidad. Este fenómeno se desarrolla dentro del hormigón armado cuando el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) penetra por la red porosa del hormigón y reacciona con los hidratos del cemento. Inicialmente el CO_2 reacciona con el agua y forma ácido carbónico.



El ácido carbónico, reacciona particularmente con la portlandita, con los silicatos de calcio hidratado y con los aluminatos cuando la pasta conserva un pH aproximado de 12-14, dando lugar al carbonato de calcio entre otros. Estas reacciones son las responsables del descenso del PH:



El inconveniente de este proceso surge cuando las reservas existentes de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ sufren la carbonatación y el pH general de la disolución de poro reduce su alcalinidad, alcanzando valores cercanos a pH=9. Esta reducción desplaza el metal en el diagrama de Pourbaix presentado anteriormente, desde la zona de pasividad hasta la zona de corrosión (ver Imagen 12). En consecuencia, la capa pasiva se deteriora, y la magnetita protectora Fe_3O_4 se transforma en óxidos/hidróxidos solubles más estables, generando OH^- necesarios para la reacción del ácido carbónico. (Felix & Rodriguez, 2018).

El estudio del frente de avance de la carbonatación se realiza mediante el revelado con fenolftaleína 0.1M. En la Imagen 15 se muestran ejemplos de este estudio.



Imagen Nº 14. Revelado de carbonatación con fenolftaleína.

FUENTE: Elaboración propia

Tanto el estudio de la penetración de los cloruros como de la carbonatación suponen una inestimable ayuda para técnicos e investigadores en el ámbito de la inspección preliminar de una estructura de hormigón armado en lo que respecta a la corrosión. La detección de agentes agresivos y el alcance del frente de avance permite establecer modelos de predicción de su vida útil. Los primeros estudios en este campo fueron los realizados por el investigador sueco Tuutti en 1982. (Tuutti, 1982)

2.4.5 Diagrama de Tuutti

El diagrama de Tuutti sirvió para representar gráficamente la respuesta de una estructura frente al fenómeno de la corrosión. Fue propuesto por Kyösti Tuutti ingeniero del Instituto sueco de investigación del cemento y el hormigón en 1982.

El modelo propuesto dividió la vida útil y la respuesta de las estructuras respecto a la corrosión en dos periodos fácilmente diferenciables: el periodo de iniciación (t_0), tiempo que tardan en penetrar los agentes despasivantes el hormigón armado hasta lograr alcanzar el refuerzo; y el periodo de propagación (t_1), tiempo transcurrido entre el inicio de la corrosión y el momento en el cual el grado de deterioro de la estructura es tal, que no cumple con las condiciones de servicio requeridas. (Traversa, Villagran , & Di Maio, 2007)

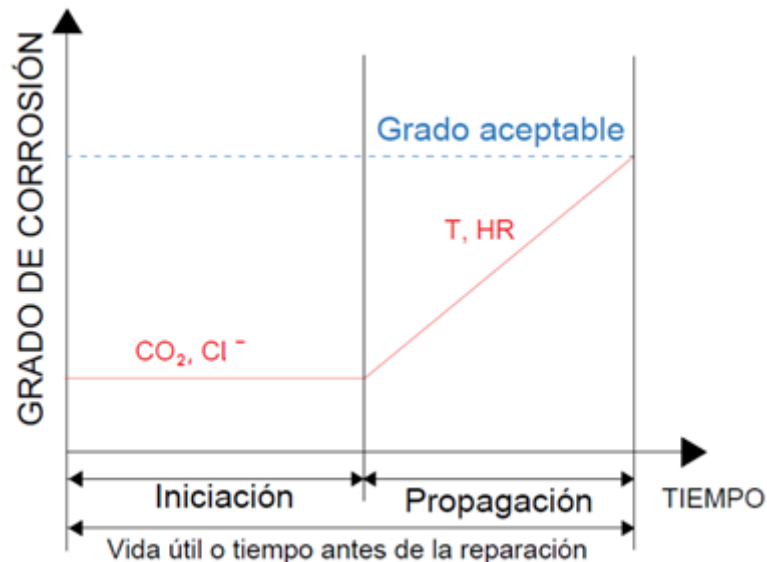


Imagen N° 15: Diagrama de Tutti. Etapas de iniciación y propagación

Fuente: (Tutti, 1982)

Una vez los agentes despasivantes han alcanzado las armaduras se requiere de técnicas de inspección sofisticadas y complejas que permitan conocer el estado de las armaduras. Sin embargo, antes de entrar en el ámbito de la inspección y medida de la corrosión se deben conocer los tipos de corrosión que se pueden desarrollar en las estructuras de hormigón armado.

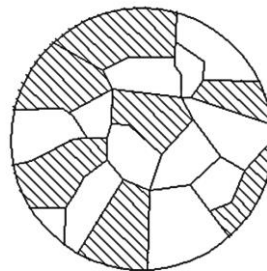
2.5 TIPOS DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO

El fenómeno de la corrosión en las armaduras embebidas en hormigón se puede producir de dos modos distintos en función de la separación física del ánodo y cátodo que participan del proceso: por microcelda o por macrocelda.

2.5.1 Microcelda

Este tipo de corrosión se produce por las heterogeneidades de composición o microestructura que existen a nivel microscópico en un metal. Cada heterogeneidad tiene su propia variación de energía libre, haciendo que la micropila quede definida entre las dos fases diferenciadas de la microestructura, con la existencia del ánodo (borde de grano), cátodo (grano), electrolito (medio corrosivo), y conducción eléctrica (interior del metal) (Martinez A. , 2016).

Las armaduras utilizadas en estructuras de hormigón armado están fabricadas de un acero hipoeutectoide, con un porcentaje de carbono alrededor del 0.13%. A nivel microestructural el acero presentará la siguiente distribución de fases.



COLONIAS DE PERLITA
GRANOS DE α PRIMARIA

Imagen Nº 16. Microestructura del acero de armaduras

Fuente. (Martinez A. , 2016)

Esta diferencia de fases permite la aparición de micro zonas (micro ánodo y micro cátodo) con diferente potencial eléctrico, ya que cada heterogeneidad tiene diferente variación de energía libre de Gibbs al convertirse en hidróxido, lo que origina la existencia de micro pilas de acción local. Como se puede apreciar en la Imagen 17, aunque a nivel macroestructural un área se comporte como un ánodo, a nivel microestructural existen microánodos y microcátodos entre los que se establecen microcorrientes. Esto también ocurre en los cátodos, sin embargo, en estas zonas las microcorrientes de corrosión son despreciables.

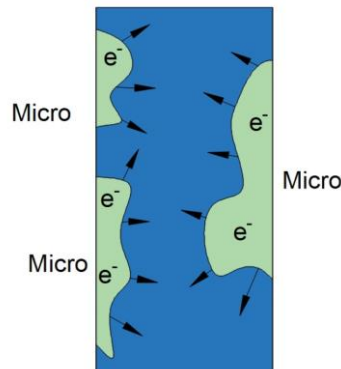


Imagen Nº 17: Comportamiento de microcelda, en trozo de acero

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Macrocelda

A diferencia de la microcelda, las macroceldas se caracterizan por la aparición de los procesos anódicos y catódicos separados físicamente en la superficie del metal. En el caso de las armaduras embebidas en hormigón se pueden diferenciar las zonas que conservan la capa pasiva y aquellas regiones cuya exposición a los agentes agresivos han destruido la capa protectora del refuerzo. La diferencia de potencial existente entre las diferentes zonas genera una corriente que circula entre estas regiones, la corriente de macrocelda. El valor de dicha diferencia de potencial regula el intercambio de electrones que se produce entre las diferentes regiones creadas en la superficie del refuerzo.

Durante este proceso en el ánodo se genera la oxidación del metal y, por tanto, el deterioro por corrosión; en el cátodo se produce la reducción del metal y, en consecuencia, su estabilización.

Las corrientes que circulan en las macroceldas se desplazan gracias a que ambas áreas se encuentran interconectadas entre sí eléctricamente por el entramado del armado. La disolución de poro del hormigón actúa como electrolito para el desplazamiento de los hidróxidos, cerrando el circuito y generándose así una macropila de corrosión.

Es de resaltar que, por lo general, el área pasiva (catódica) tiene mayor superficie metálica que el área activa (anódica). Esta relación de superficies acelera el proceso de corrosión y condiciona la velocidad a la que se corroe la zona anódica.

Para explicar como ocurre este fenómeno en un elemento de hormigón armado se tomará como ejemplo el proceso de corrosión que sufre el refuerzo embebido en un muro de contención en una zona portuaria, el cual se encuentra

en contacto directo con una superficie de agua en el trasdós y a la intemperie en el intradós, como se muestra a continuación:

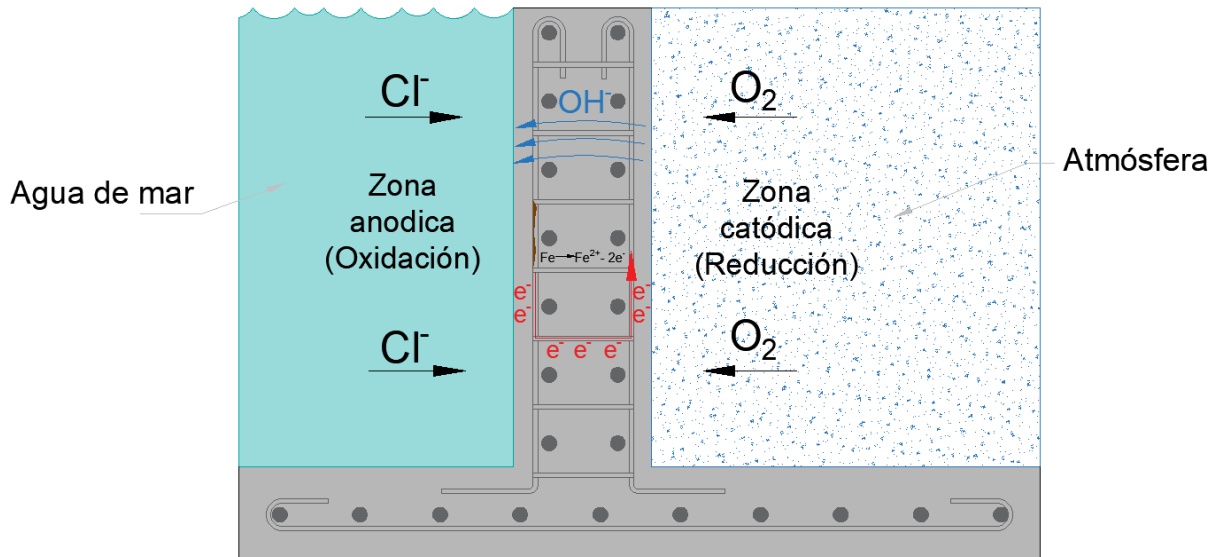


Imagen Nº 18: Proceso de corrosión en muro de contención en zona portuaria.

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la imagen anterior, en el trasdós del muro los cloruros han logrado difundir hasta el acero de refuerzo. En cambio, en el intradós, las armaduras únicamente se ven afectadas por la llegada del oxígeno gracias a la permeabilidad del hormigón. Debido a que la armadura de ambas caras se encuentra conectada eléctricamente por los estribos y la existencia de una disolución de poro en la matriz de hormigón, se genera una macrocelda de corrosión.

Como consecuencia, las picaduras en la zona anódica tienen muy poca superficie frente a la zona catódica, la cual comienza a demandar electrones del área que se corroe. Estos electrones viajan a través de los estribos, que sirven como medio conductor; mientras que el oxígeno contribuye en la formación de iones hidroxilos en el cátodo, que viajan a través de la disolución de poro, cerrando así el circuito originado por la macrocelda. Para comprender este fenómeno a nivel teórico se debe recurrir a las ecuaciones de Butler-Volmer y su representación gráfica.

2.5.3 Ecuaciones de Butler-Volmer

Esta teoría fundamental en la cinética electroquímica surge del trabajo colaborativo entre John Alfred Valentine Butler (1924) y Max Volmer (1930). Los estudios presentados por estos autores permiten determinar la velocidad de un

proceso electroquímico bajo la premisa de que la transferencia de los electrones es la única que controla la velocidad del proceso global. Se le llama régimen puro de transferencia electrónica o régimen de activación. (Escobedo , 2018)

En el hormigón armado, la corrosión por macroceldas es posible al existir conexión eléctrica entre las armaduras (o áreas de acero) en diferentes entornos fisicoquímicos que conducen a diferentes estados electroquímicos (acero activo y pasivo).

Las barras de acero bajo fenómenos de corrosión activa y armaduras todavía en estado pasivo deben analizarse primero como dos sistemas electroquímicos independientes (sin conexión eléctrica) (Imagen 19). Para condiciones uniformes, el comportamiento de polarización de tales sistemas electroquímicos puede describirse mediante la ecuación de Butler-Volmer ya sea para acero activo (ecuación (1)) o acero pasivo (ecuación (2)). La ecuación de Butler-Volmer corresponde a la suma algebraica de las densidades de corriente anódica y catódica involucradas en un sistema electroquímico siguiendo la ley de Tafel. (Nasser, Clément, Laurens, & Castel, 2009)

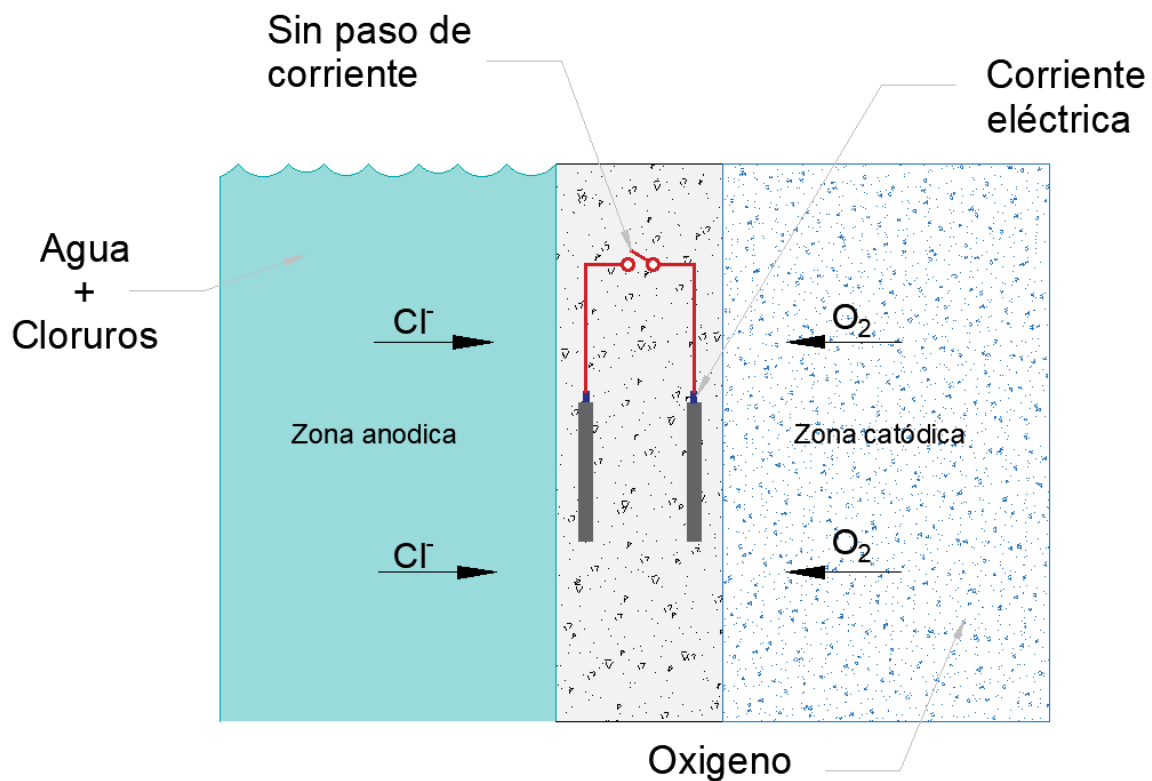


Imagen Nº 19: Sistema electroquímico sin conexión eléctrica

Fuente: Elaboración propia

$$i_a = i_{corr}^a \left[\exp \left(\frac{\log(10)}{\beta_a^a} (E^a - E_{corr}^a) \right) - \exp \left(\frac{-\log(10)}{\beta_c^a} (E^a - E_{corr}^a) \right) \right] \quad (1)$$

$$i_p = i_{corr}^p \left[\exp\left(\frac{\log(10)}{\beta_a^p} (E^p - E_{corr}^p)\right) - \exp\left(\frac{-\log(10)}{\beta_c^p} (E^p - E_{corr}^p)\right) \right] \quad (2)$$

• i_a y i_p son las densidades de corriente aparente (o neta) que fluyen a través de la interfaz electroquímica para los estados activo y pasivo, respectivamente.

• E^a y E^p son los potenciales de barras de acero activas y pasivas polarizadas (alrededor de E_{corr}), respectivamente.

• i_{corr}^a y i_{corr}^p son las densidades de corriente de corrosión que ocurren en barras de acero activas y pasivas, respectivamente ($i_{corr}^a \gg i_{corr}^p$).

• E_{corr}^a y E_{corr}^p son los potenciales de corrosión libres de barras de acero activas y pasivas, respectivamente ($E_{corr}^a \ll E_{corr}^p$).

• β_a^a y β_a^p son las constantes anódicas de Tafel para barras de acero activo y pasivo respectivamente ($\beta_a^a < \beta_a^p$).

• β_c^a y β_c^p son las constantes anódicas de Tafel para barras de acero activo y pasivo respectivamente ($\beta_c^a \approx \beta_c^p$).

La Imagen 20 recoge la representación gráfica del comportamiento cinético (corrosión) y electroquímico (potencial) de ambos sistemas independientes.

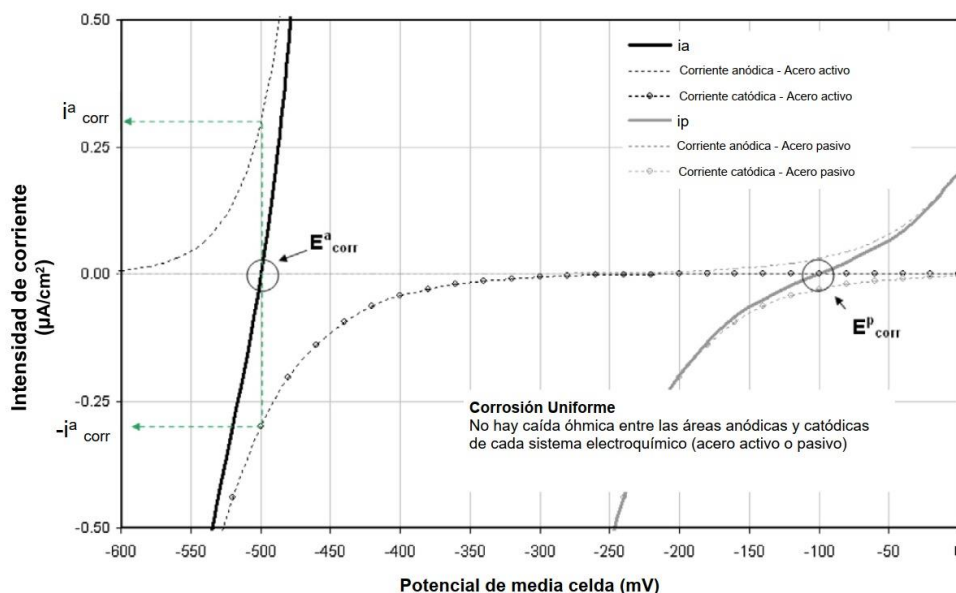


Imagen N° 20. Sistemas electroquímicos independientes de barras de acero activas y pasivas. Densidades de corriente ($\mu A/cm^2$) Vs potencial (mV vs. SCE).

Fuente: (Nasser, Clément, Laurens, & Castel, 2009)

En la gráfica anterior se muestran las densidades de corriente aparente de acuerdo con las ecuaciones de Butler-Volmer para la condición de acero activo (i_a) y para la condición del acero pasivo (i_p).

La representación presentada en la Imagen 20 recoge el comportamiento de polarización de barras de acero activas y pasivas que actúan como sistemas electroquímicos independientes. Para esta situación, el potencial de equilibrio (E_{corr}) corresponde al valor para el cual la densidad de corriente anódica (i_{corr}^a para acero activo y i_{corr}^p para acero pasivo) compensa la densidad de corriente catódica ($-i_{corr}^a$ para acero activo y $-i_{corr}^p$ para acero pasivo). Por lo tanto, en este punto, incluso si puede ocurrir corrosión (especialmente para el acero activo), no hay una densidad de corriente aparente que fluya a través de la interfaz electroquímica. Por lo tanto, no hay caída óhmica entre los potenciales anódico y catódico que son idénticos e iguales a E_{corr} . Esto se conoce como corrosión uniforme.

En la gráfica también se representan las densidades de corriente anódica y catódica (líneas discontinuas) para cada sistema electroquímico. Si un sistema es excitado por una polarización positiva con respecto a E_{corr} , la corriente anódica aumenta mientras que la corriente catódica se reduce. Esto se conoce como polarización anódica, lo que resulta en una densidad de corriente aparente positiva que fluye a través de la interfaz electroquímica. Si el sistema es excitado por una polarización negativa con respecto a E_{corr} , la corriente catódica aumenta mientras que la corriente anódica disminuye. Esto se conoce como polarización catódica, lo que resulta en una densidad de corriente aparente negativa que fluye a través de la interfaz electroquímica. Esta doble polarización se produce por la conexión eléctrica de ambos sistemas presentados anteriormente, según se define en la Imagen 21.

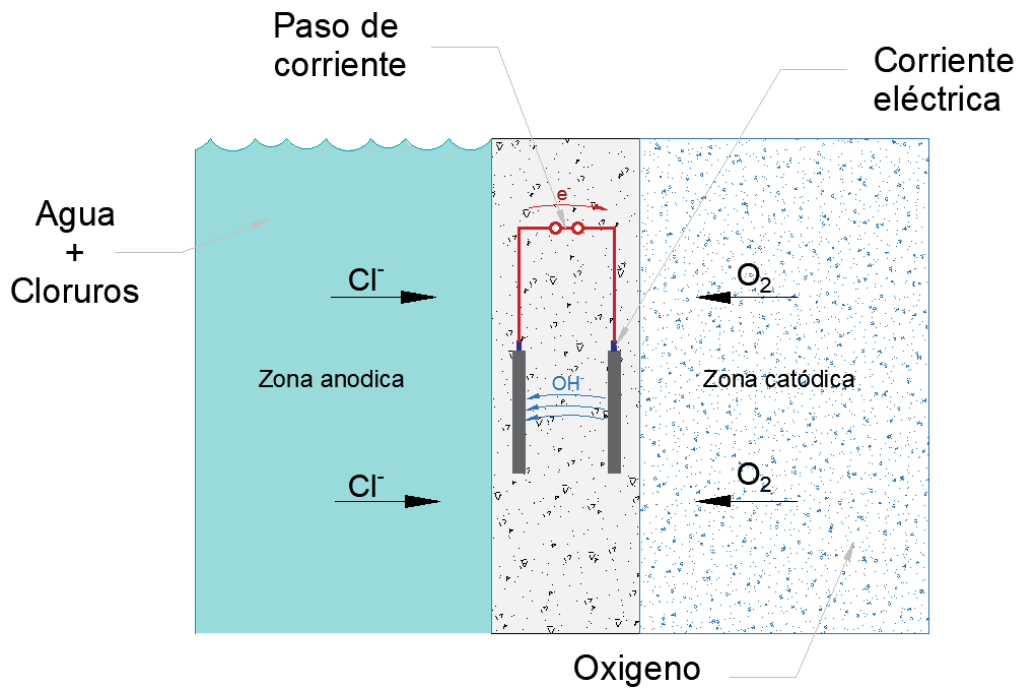


Imagen Nº 21. Sistema electroquímico con conexión eléctrica

Fuente: Elaboración Propia

La representación de las ecuaciones de Butler-Volmer una vez ambos sistemas están conectados eléctricamente se recoge en la Imagen 22.

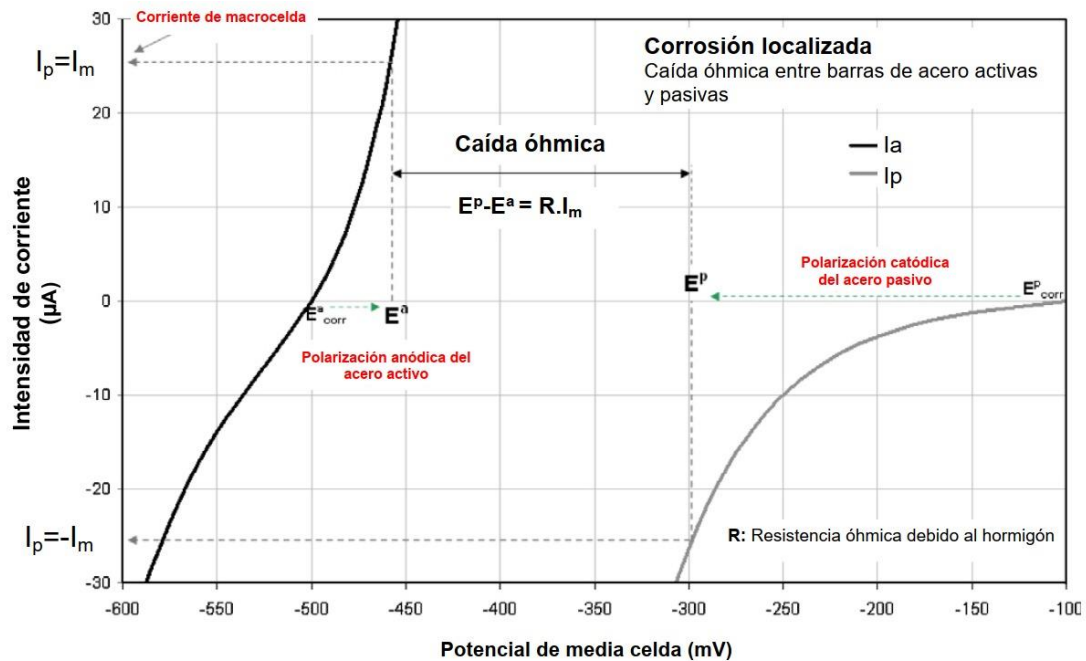


Imagen Nº 22. Sistemas electroquímicos acoplado de barras de acero activas y pasivas. Intensidades de corriente (microA) Vs potencial (mV/SCE).

Fuente: (Nasser, Clément, Laurens, & Castel, 2009)

En la Imagen anterior se puede apreciar el principio general de la corrosión de macrocelda resultante de la conexión eléctrica de barras de acero activas y pasivas. Este fenómeno se basa en los sistemas electroquímicos anteriores que ahora se consideran conectados eléctricamente. Cabe señalar que la discusión se presenta ahora en intensidades de corriente y no en densidades de corriente ya que es necesario tener en cuenta la relación de superficie pasiva y superficie activa que puede existir en estructuras reales.

Tras la conexión eléctrica, el potencial de acero activo se ve atraído hacia valores de potencial más altos, mientras que el potencial de acero pasivo se atrae hacia valores más electronegativos. De acuerdo con la discusión anterior, el acero activo está polarizado anódicamente (desde E_{corr}^a hasta E^a) dando como resultado una intensidad de corriente positiva aparente (i_a) que fluye a través de la interfaz activa acero-hormigón y el acero pasivo está polarizado catódicamente (desde E_{corr}^p hasta E^p) resultando en una aparente intensidad de corriente negativa (i_p) que fluye a través de la interfaz pasiva acero-hormigón.

Debido a la distancia entre las áreas de acero activa y pasiva y a la resistividad del hormigón, los nuevos potenciales de equilibrio de cada sistema no alcanzan el mismo valor.

$$E^p - E^a \neq 0$$

El equilibrio de este sistema electroquímico satisface las dos restricciones siguientes:

$$i_a = i_p = i_m$$
$$E^p - E^a = R * i_m$$

donde i_m es la corriente de macrocelda del sistema electroquímico acoplado y R es la resistencia óhmica del hormigón entre las barras de acero que participan del sistema.

2.6 TÉCNICAS DE MEDIDA DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Como ya se indicó en los apartados anteriores, la corrosión es un grave problema que acelera el deterioro de las armaduras embebidas en el hormigón armado. Por lo cual, se hace necesario evaluar de este fenómeno, y de existir, conocer su estado y la velocidad a la que se propaga, de tal forma que pueda actuarse oportunamente y dar tratamiento a los elementos afectados. A partir de estas afirmaciones, en los siguientes apartados se definen las principales técnicas de medida cualitativas y cuantitativas que existen para caracterizar este fenómeno.

2.6.1 Técnicas cualitativas

Las técnicas cualitativas son métodos de medida que únicamente aportan datos sobre el estado de las armaduras o el recubrimiento, sin hacer referencia al valor real de la corrosión que pueda sufrir el acero.

2.6.1.1 Potencial de corrosión

La medida del potencial de corrosión es una técnica que proporciona información cualitativa para orientar acerca de la situación activa o pasiva las armaduras, es decir, ofrece información de la probabilidad o riesgo de corrosión de esta.

Sirve fundamentalmente para generar mapas de potencial que identifiquen aquellas zonas que son más propicias a sufrir fenómenos de corrosión. (Martinez, Andrade, Alonso, & Fullea, 2001)

La medida del potencial de corrosión es una técnica estática, ya que no se altera el estado natural del metal, por lo que se considera no destructiva. El método se basa en la medida de la diferencia de potencial eléctrico entre una armadura (WE) y un electrodo de referencia (RE) y obtener el valor del potencial de corrosión (E_{CORR}).

Para realizar este ensayo debe disponerse de un voltímetro de alta impedancia al cual se deben conectar la referencia al polo negativo y la conexión a la armadura al polo positivo. La referencia utilizada normalmente en laboratorio es un electrodo de calomelanos saturado (SCE) o un Ag/AgCl por ser electrodos estables y de fácil mantenimiento, en medidas de campo es habitual emplear los de Cu/CuSO₄ por ser robustos y resistentes. La referencia se apoya sobre la superficie del hormigón y para asegurar el contacto eléctrico entre la referencia y el hormigón se dispone de una esponja o una bayeta húmeda, tal y como se muestra en la Imagen 23.

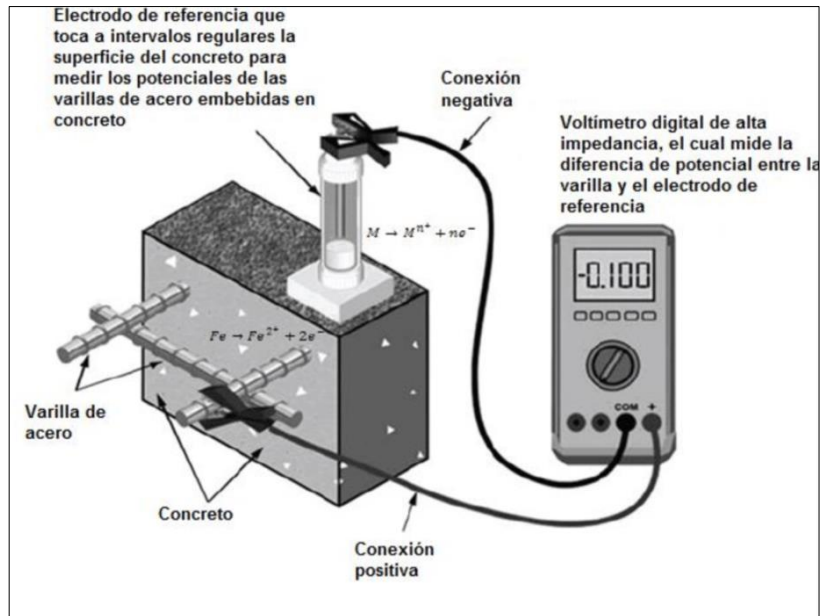


Imagen Nº 23: Montaje Ecorr

Fuente: (ASTM C-876, 2015)

Como ya se adelantó anteriormente, los valores obtenidos de E_{CORR} no cuantifican la velocidad de corrosión, pero permiten clasificar el riesgo de corrosión mediante los criterios establecidos en las normas ATSM C-876 o la norma UNE-112083:2010

Tabla 2. Clasificación del riesgo de corrosión según ATSM C-876.

Valores de potencial eléctrico ASTM C876		Condición de la corrosión
(mV vs SCE)	(mV vs CSE)	
<-476	<-500	corrosión severa
<-276	<-350	Alta (<90% de riesgo de corrosión)
-126 a -275	-350 a -200	Riesgo intermedio de corrosión
>-125	>-200	Bajo (10% de riesgo de corrosión)

Fuente: (ASTM C876-91, 2005)

La medida del potencial de corrosión no aporta mucha más información sobre el estado de las armaduras, por lo que la mayoría de los técnicos complementan esta medida con el análisis de la resistividad del recubrimiento.

2.6.1.2 Resistividad mediante el método directo.

Esta técnica se basa en la existencia de una relación inversa entre la resistividad eléctrica de un hormigón y la velocidad de corrosión del acero, la cual depende entre otros factores de la humedad del hormigón y la temperatura, pero también del tipo de hormigón y la dosificación utilizada para su fabricación.

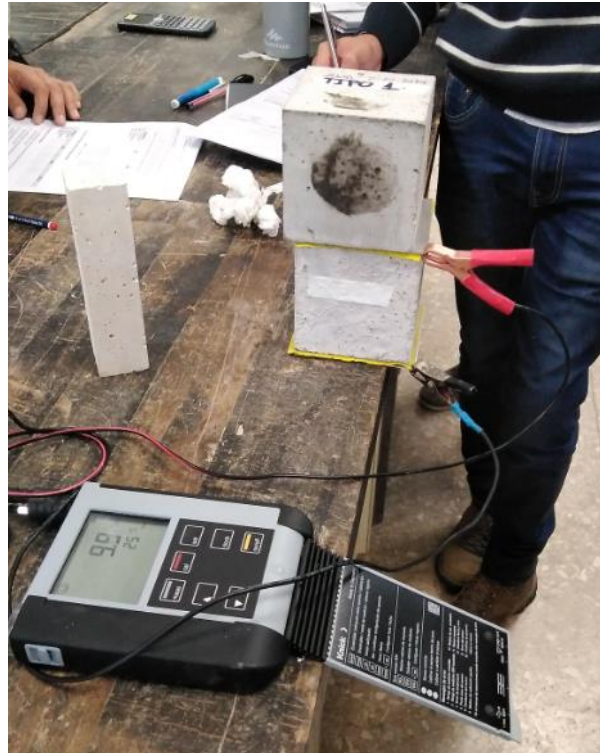


Imagen Nº 24: Montaje resistividad en el laboratorio

Fuente: Laboratorio UPV-2020

En función del elemento a analizar, la UNE propone diferentes técnicas de medida. Para el caso del análisis de probetas en laboratorio se utiliza el método directo. Esta técnica de medida consiste en la aplicación de un campo eléctrico entre los dos extremos de una muestra. Para ello se colocan dos electrodos en las dos caras opuestas con un paño húmedo. La medida se realiza con un conductímetro. La medida de la conductancia eléctrica del hormigón (G) en Siemens (s) corresponde a la inversa de la resistencia eléctrica ($R=1/G$). Este valor obtenido puede normalizarse por la constante de celda (dimensiones de la probeta) para obtener la resistividad (ρ) en ohmios por metro ($\Omega \cdot \text{cm}$).

Para el caso de medidas sobre estructuras existentes se utiliza un conductímetro de Wenner o método de las 4 puntas, procedimiento también recogido en la norma española UNE 83988-2:2014. (UNE, 2014)

Algunos autores han establecido a partir de la medida de la resistividad, bien de probetas en las mismas condiciones que el elemento analizar (en laboratorio) o las condiciones del recubrimiento (en estructuras reales) las categorías en las que pueden agruparse los valores obtenidos. Esta clasificación permite determinar el posible riesgo de la existencia de fenómenos de corrosión en las armaduras embebidas.

Tabla 3. Grado de corrosión por resistividad

Resistividad (Ohm.cm)	Riesgo de Corrosión
>20 000	Despreciable
10 000 a 20 000	Bajo
5 000 a 10 000	Alta
Menos de 5 000	Muy Alto

Fuente: (Brown, 1992)

La utilización conjunta de la medida de la resistividad del recubrimiento como del potencial de corrosión aportan información que permite tener una idea del estado de las armaduras a nivel interno. Sin embargo, ninguno de los métodos aporta información real sobre el valor de la corrosión y el estado de las armaduras. Para ello, se debe recurrir a las técnicas cuantitativas (Ortega, 2018).

2.6.2 Técnicas cuantitativas

Para conocer el valor numérico de la corrosión se deben emplear los métodos de medida cuantitativos, que se sirven de técnicas electroquímicas para conocer dicho parámetro. En los siguientes apartados se describen los dos métodos más importantes, y un tercer método, propuesto por investigadores de la UPV y que se ha utilizado para llevar a cabo el trabajo experimental que en este trabajo se recoge.

2.6.2.1 Método de Extrapolación de Tafel

Alrededor de 1905 Julius Tafel, químico suizo, logró establecer la relación entre la velocidad de una reacción electroquímica que atraviesa un sistema, y la sobretensión aplicada en este. Definido como el **Método de Extrapolación de Tafel**, esta técnica está basada en la representación gráfica del logaritmo del valor absoluto de la corriente anódica y catódica del electrodo en función de un sobrepotencial aplicado (η) (MEAS, 2015).

Este método de medida está basado en la polarización progresiva de un metal mediante dos barridos de potencial significativamente altos. Para ello se requiere una celda de medida a 3 electrodos (un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un contraelectrodo) y un aparato de medida con suficiente precisión para llevar a cabo la alteración del sistema y recopilar la información en forma de respuesta que el sistema ofrece (potenciostato/galvanostato) (Sanchez , 2018).

Con la información obtenida se pueden representar las curvas de polarización, tanto anódica como catódica de un metal para conocer su estado cinético.

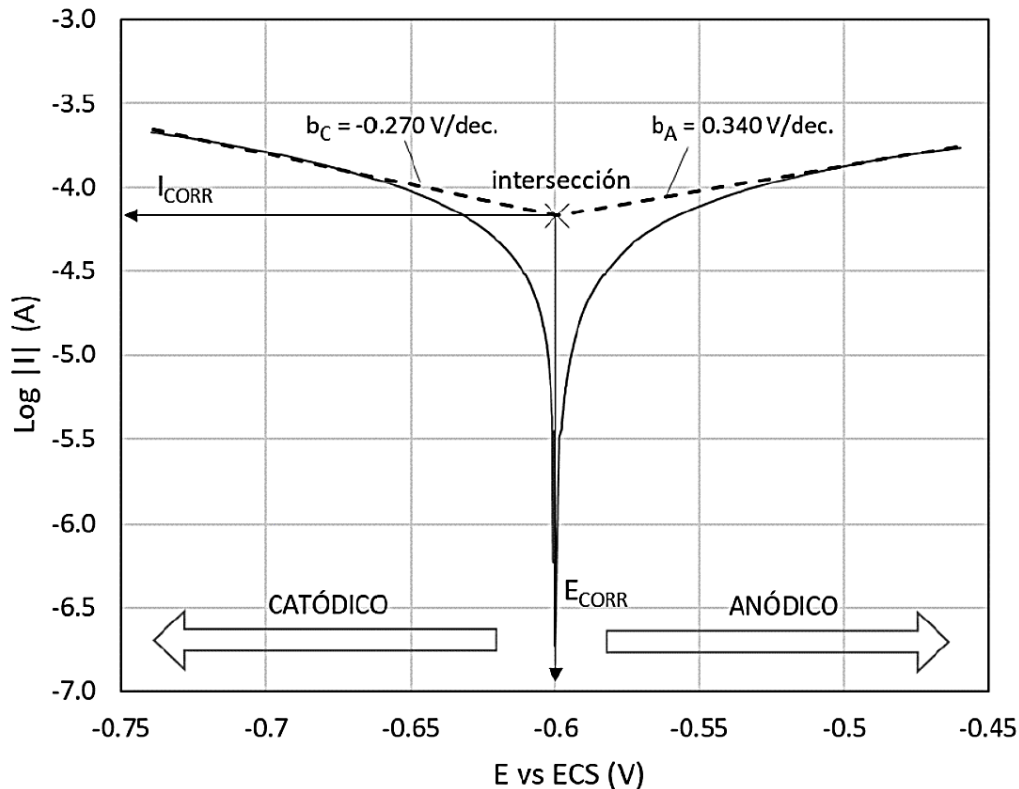


Imagen Nº 25. Curvas de polarización de Tafel.

Fuente: (Ramón, 2018)

El diagrama de la Imagen 25 muestra las ramas anódica y catódica obtenidas tras la aplicación de un sobrepotencial (η). La representación más habitual de esta medida se realiza mediante el valor de sobrepotencial (η) en las abscisas y el logaritmo del valor absoluto de la corriente en las ordenadas $\log |I|$.

Tanto la rama anódica como la catódica presentan un tramo lineal en su evolución (comienzan a partir de los 59 mV) añadir referencia, y que permiten obtener la información necesaria de la muestra analizada. Para ello, deben prolongarse los tramos lineales de las ramas anódica y catódica hasta su intersección; en este punto, en las abscisas se lee el potencial de corrosión E_{CORR} y en las ordenadas el valor de intensidad de corriente i_{CORR} (Imagen 25).

A pesar de la gran precisión de este método de medida, una de las limitaciones más grandes que posee radica en que se debe utilizar un rango muy amplio de potenciales, que puede producir en el metal polarizaciones importantes y en ocasiones irreversibles. Esta medida además genera un

desplazamiento del estado natural de la muestra que puede precisar de un periodo de tiempo (más de tres días) para volver a su estado inicial.

Con el objetivo de subsanar estos problemas muchos investigadores trataron de mejorar la técnica de medida o buscar métodos alternativos. Uno de los métodos que más éxito ha cosechado ha sido el análisis de la corrosión a través del estudio de la resistencia a la polarización lineal.

2.6.2.2. Método de la resistencia a la polarización lineal

El estudio de la resistencia a la polarización lineal (R_p) es una técnica electroquímica desarrollada para determinar el valor de R_p , lo que permite estimar el valor de la intensidad de corrosión de un metal de una forma rápida mediante la ecuación de Geary. (Rodríguez Gómez, 2014). Este método se fundamenta que la zona próxima al potencial de corrosión guarda una relación lineal entre el potencial aplicado al metal y la corriente que circula en el sistema polarizado (Carnevali, 2018). Por tanto, la intensidad de corrosión puede hallarse mediante la siguiente expresión:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

donde B es la constante de Stern y Geary que depende del sistema metal/medio corrosivo (Ramón, 2018). Para el cálculo de la intensidad de corrosión puede adoptarse un valor fijo del parámetro B entre 13 y 52 mV, según se estudie una zona activa o zona pasiva de la armadura. Sin embargo, como normalmente no se conoce el estado de la armadura se suele utilizar un valor de 26 mV. Esta simplificación puede llevar a error (con un factor de 2) en el cálculo de la i_{CORR} . En la medida de la corrosión en estructuras de hormigón armado este error es aceptable, y ha extendido su utilización. Por su sencillez y la escasa polarización que genera en el armado, la técnica de medida basada en el cálculo de la resistencia a la polarización lineal se ha convertido en la más utilizada por técnicos e investigadores. Tanto es así que se trata del método recomendado en normativas como la UNE 112072. (UNE, 2011)

Otro de los errores inducidos en la medida de la resistencia a la polarización y que la propia norma UNE indica es la necesidad de tener en cuenta la caída óhmica que genera el hormigón, lo que obliga a utilizar una técnica complementaria de apoyo al cálculo.

A pesar de la sencillez del método, el factor de error que se asume en dicha medida ha obligado a técnicos e investigadores a seguir en la búsqueda de un procedimiento más fiable.

Otro de los rangos que caracteriza tanto el método de la Extrapolación de Tafel presentado anteriormente, como la medida de la Resistencia a la Polarización Lineal es su dificultad para ser aplicadas en medidas in situ. Estas técnicas requieren de equipamiento sofisticado y útil para las medidas en laboratorio, pero con escasa presencia en el trabajo de campo.

Debido a todo lo anterior, una de las técnicas de medida surgidas en los últimos años para la determinación de la intensidad de corrosión en estructuras de hormigón armado es el método PSV, de sus siglas en inglés Pulse Step Voltammetry y que se presenta en el siguiente apartado.

2.6.2.3 Técnica de medida PSV (Pulse Step Voltammetry)

El método de medida PSV es una técnica novedosa para la determinación del valor de la intensidad de corrosión, la cual se sirve de un tren de pulsos potencioestáticos y el estudio de la respuesta que ofrece el sistema (intensidad-tiempo). Su principal ventaja frente a los demás métodos presentados anteriormente es su sencillez, el control sobre el grado de polarización que se aplica y la consideración de la caída óhmica (R_s) en los cálculos de la corrosión. Este método fue desarrollado y patentado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por el GIMH (Grupo de Investigación y Monitorización del Hormigón) del Instituto Interuniversitario de Investigación del Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM) (Ramon, 2018).

Esta técnica está basada en la construcción de las regiones lineales de las ramas anódica y catódica descritas en el método de Extrapolación de Tafel. Con la construcción de dichos tramos a partir de una secuencia de puntos validada previamente es posible obtener los datos cinéticos (corrosión) y electroquímicos (potencial) de una muestra de forma rápida y fiable. A diferencia del método de Tafel, no es necesario realizar el voltagrama completo, lo que reduce considerablemente el tiempo de medida y evita que la muestra sufra modificaciones irreversibles en su superficie producto de su polarización. (Ramón, 2018)

Los puntos para construir las regiones lineales de las ramas anódicas y catódicas se consiguen mediante la aplicación de una secuencia de pulsos potencioestáticos compuesta de tres escalones de potencial. En la Imagen 26 se presenta la secuencia de los pulsos utilizados.

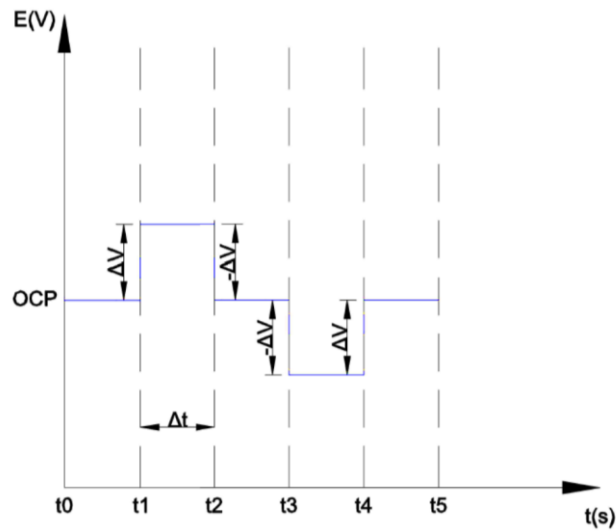


Imagen Nº 26. Secuencia básica de escalones de potencial para ensayo de PSV.

FUENTE: (Ramón, 2018)

Esta secuencia de pulsos se aplica tres veces con tres valores distintos de ΔV con la finalidad de obtener 6 puntos con los que construir las rectas (3 en la rama anódica y otros 3 en la rama catódica). La secuencia final de pulsos aplicada y con su valor correspondiente se muestra en la Imagen 27.

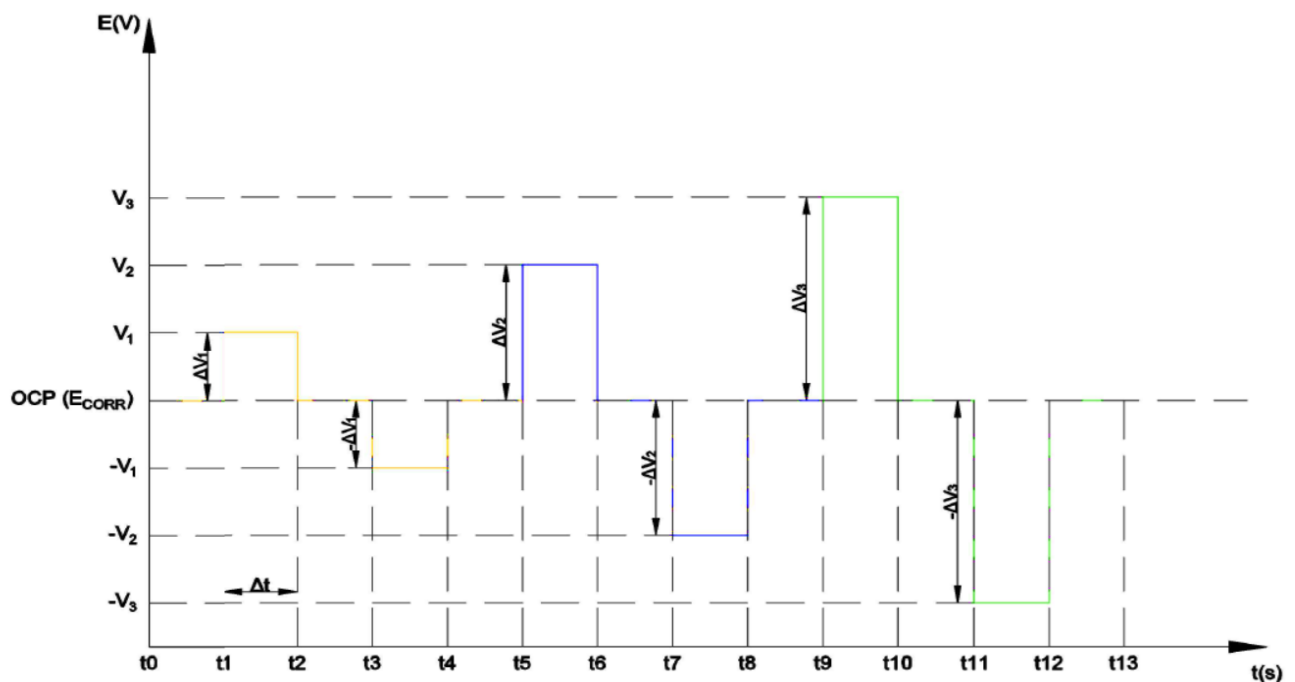


Imagen Nº 27. Secuencia de pulsos potencioestáticos para la aplicación del método PSV.

FUENTE: (Ramón, 2018)

Como se puede observar en la imagen anterior, el método desarrollado propone utilizar una secuencia de pulsos progresiva de $\pm 70\text{mV}$, $\pm 105\text{mV}$ y $\pm 140\text{mV}$, con una duración de 50 segundos por escalón de pulso. Una vez aplicado, el método de medida se basa en el estudio de la respuesta de la intensidad, y cuyo ejemplo se muestra en la Imagen 28.

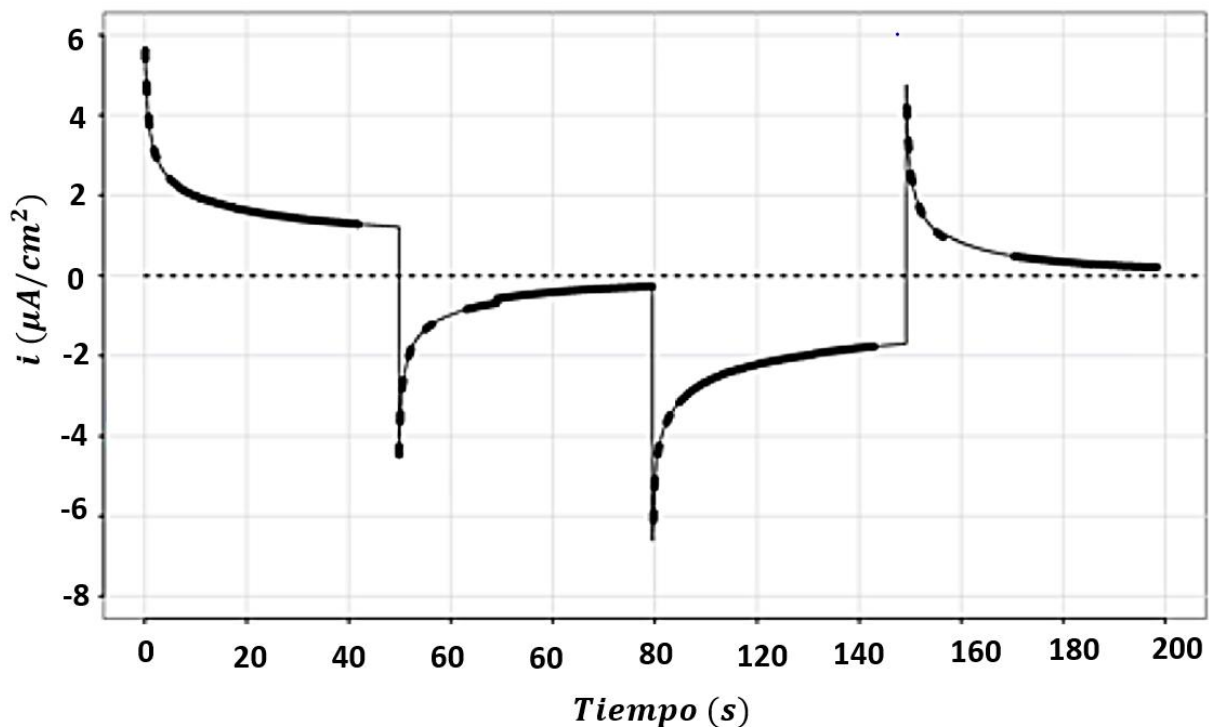


Imagen Nº 28. Respuesta de la Intensidad ante el tren de pulsos.

FUENTE: Elaboración Propia

Para el análisis de la respuesta de la intensidad que ofrece el sistema analizado, los autores del método propusieron el estudio con un circuito equivalente. Tras el estudio de diferentes modelos, el esquema eléctrico validado y propuesto para la medida de la corrosión se muestra en la Imagen 29. Se trata de un circuito mixto (en el que se incluyen procesos farádicos y no-farádicos), ya que es el modelo que mejor representa el comportamiento de la interfaz acero-hormigón.

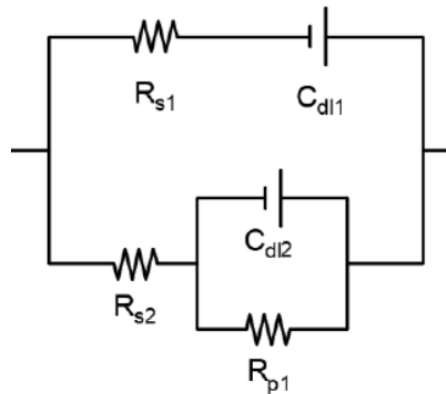


Imagen Nº 29. Circuito equivalente mixto (Farádico – no Farádico).

FUENTE: (Ramon, 2018)

El cálculo de la intensidad farádica de cada pulso se obtiene a partir del ajuste a mínimos cuadrados de la respuesta del sistema con el circuito experimental propuesto. El modelo matemático establecido para el comportamiento de este circuito se validó y corresponde a:

$$\begin{aligned}
 i_F(\Delta v_j; \eta_j t) + i_{NF}(\Delta v_j; t) &= \frac{\Delta v_j}{R_{S1}} e^{-\frac{t-t_j}{R_{S1} \cdot C_{dl1}}} + \frac{\eta_j}{R_{P2} + R_{S2}} - \frac{\Delta v_j}{R_{P2} + R_{S2}} e^{-\frac{(t-t_j) \cdot R_{P2} + R_{S2}}{R_{P2} R_{S2} C_{dl2}}} \\
 &+ \frac{\Delta v_j}{R_{S2}} e^{-\frac{(t-t_j) \cdot R_{P2} + R_{S2}}{R_{P2} R_{S2} C_{dl2}}}
 \end{aligned}$$

Este ajuste permite obtener el valor de cada componente del circuito, y, por tanto:

$$I_F = \frac{\Delta V}{R_{S2} + R_{P1}} = \frac{\Delta V}{R_T}$$

donde ΔV es el potencial aplicado en los pulsos y R_{S2} y R_{P1} los componentes de la rama farádica que participan en dicha transferencia. Una de las ventajas de este método es la consideración en la propia medida de la caída óhmica del sistema. Este parámetro se tiene en cuenta en la corrección del sobrepotencial aplicado (η), el cual equivale a:

$$\eta = \Delta V - (I_F \cdot R_S)$$

y donde R_S es la resistencia eléctrica del hormigón, que se calcula con los valores del circuito equivalente mixto R_{S1} y R_{S2} .

$$R_s = \frac{1}{\frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}}}$$

Con los datos de la intensidad farádica (I_F) y el sobrepotencial real de cada pulso (ΔV) se pueden construir las regiones lineales de las ramas anódicas y catódicas de la extrapolación de Tafel según se muestra en la Imagen 30.

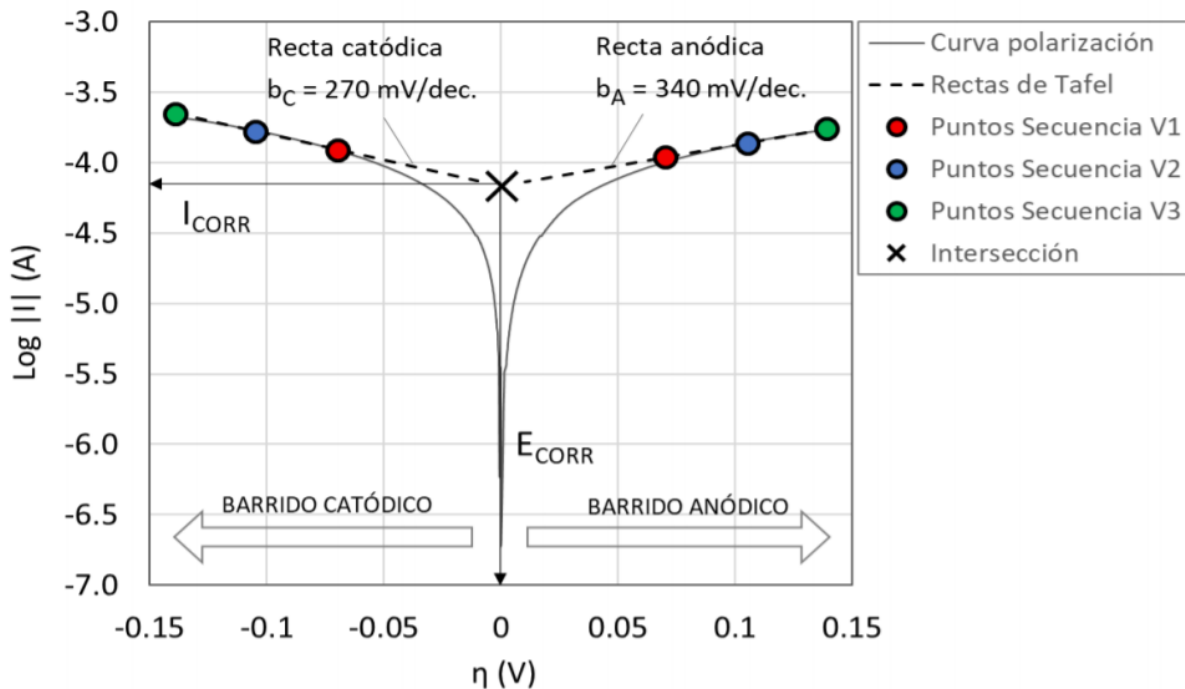


Imagen Nº 30: Curva de polarización con puntos de secuencia de potencial de PSV

FUENTE: (Ramon, 2018)

Como se puede observar en la gráfica solo hacen falta tres puntos en la zona anódica y tres puntos en la zona catódica para construir las rectas con las que se podrá determinar E_{CORR} e i_{CORR} . Otra de las ventajas del método es su aporte de información, ya que la técnica permite conocer otros parámetros del proceso de corrosión (R_p , R_s o C_{dl}) Además, la construcción de las pendientes de Tafel (b_C y b_A) permiten calcular el valor de la constante de Stern y Geary.

$$B = \frac{b_A b_C}{2.303 * (b_A + b_C)}$$

Otra de las ventajas del método es su velocidad de aplicación, su precisión y fiabilidad, tal y como se ha demostrado en numerosos trabajos. (Ramon, 2018). Sin embargo, el hecho que ha convertido esta técnica en un método clave para el estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado es su

implementación en un sistema de sensores embebidos denominado INESSCOM, desarrollado por el propio grupo de investigación que patentó la técnica de medida.

2.6.2.4 Sistema de sensores embebidos para monitorizar la corrosión en estructuras de hormigón armado

El sistema de monitorización INESSCOM (de sus siglas en inglés "Integrated Sensor Network for Corrosion Monitoring") se ha servido para utilizar la técnica de medida PSV descrita anteriormente en sensores embebidos previamente al hormigonado en estructuras de hormigón armado. Este método fue propuesto por el Dr José Enrique Ramón Zamora en el 2018 en la Universitat Politècnica de València y se compone de los siguientes elementos (ver imagen N° 31):

-sensor: actúa como electrodo de trabajo (ET) y se trata de una pieza de acero al carbono de características análogas a las del acero de la armadura. De este sensor se conoce su superficie, diámetro y longitud. El sensor se posiciona dentro del hormigón y se mantiene en su posición durante el hormigonado mediante elementos aislantes fabricados mediante impresión 3D. Este sensor cuenta con una conexión eléctrica al exterior, lo que permitirá su medida;

-armado estructural: actúa como contraelectrodo (CE) y se utiliza como pseudo-referencia (ER). Previamente al hormigonado se debe realizar una conexión eléctrica con cableado al exterior del elemento;

-soporte: se trata de elementos fabricados mediante impresión 3D que facilitan la colocación del sensor en la posición correcta y lo mantienen fijo durante las operaciones de hormigonado;

-conexiones eléctricas: cableado de los elementos embebidos que enlaza el sensor y la armadura con el sistema de medida;

-sistema de medida: equipo portátil para la ejecución de la medida y la recopilación de la respuesta.

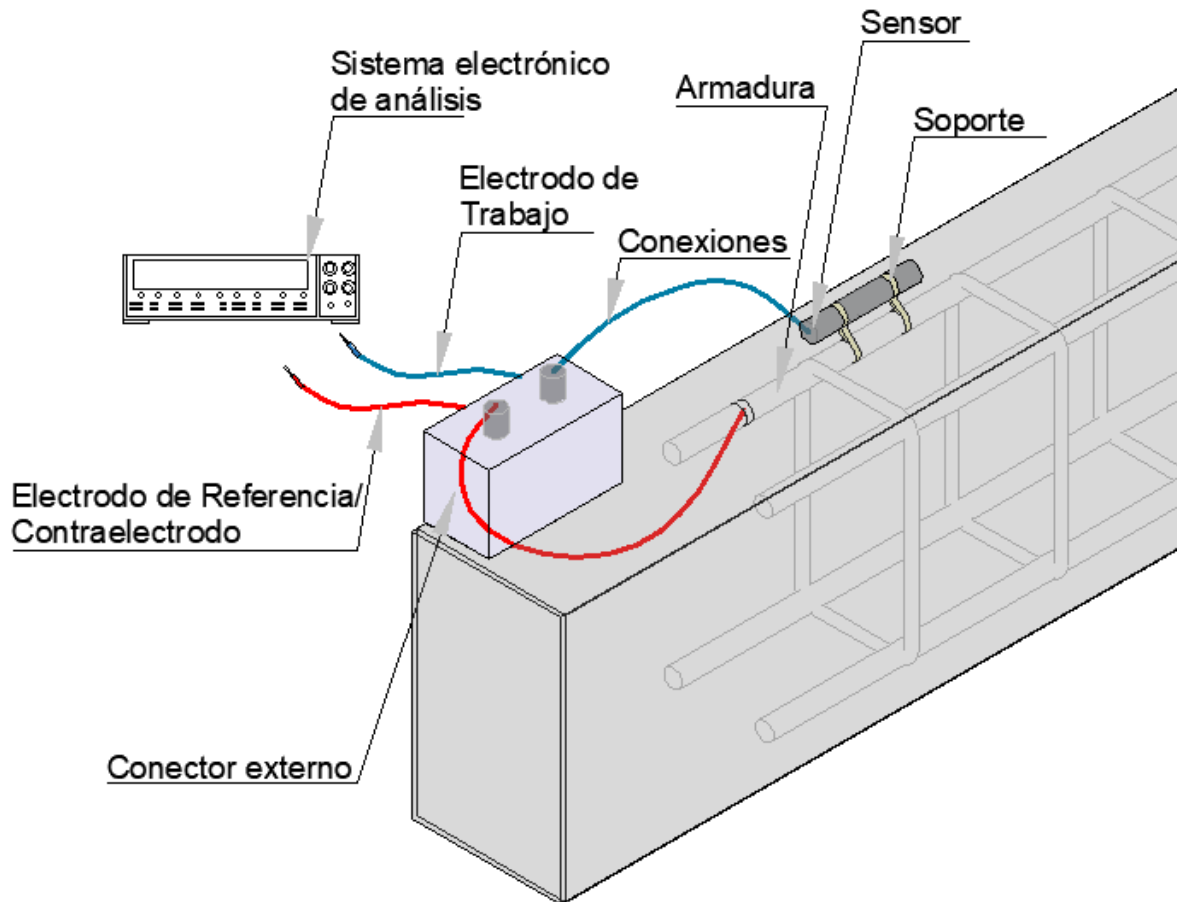


Imagen Nº 31: Esquema del sensor de monitorización de la corrosión.

FUENTE: Elaboración Propia

En la Imagen 31 se muestran el diagrama del sistema utilizado por INESSCOM. Como puede observarse, el sensor se encuentra embebido en la viga y sujeto a la armadura mediante un soporte no conductor.

El cable que sale del sensor, junto con el cableado de la armadura (contra electrodo) permiten establecer dos estados de funcionamiento del sensor (Imagen 32):

- estado normal; posición que se mantienen mientras no se realice ninguna medida y que une eléctricamente el sensor y la armadura. Esta configuración permite que el sensor participe de los procesos en los que se ve expuesta la armadura más próxima, como pueden ser las macroceldas (ver apartado 2.5.2.);

- estado de medida; configuración en la que sensor y armadura se mantienen independientes para poder llevar a cabo la técnica de medida PSV. A la finalización de la medida el sistema vuelve al estado normal.

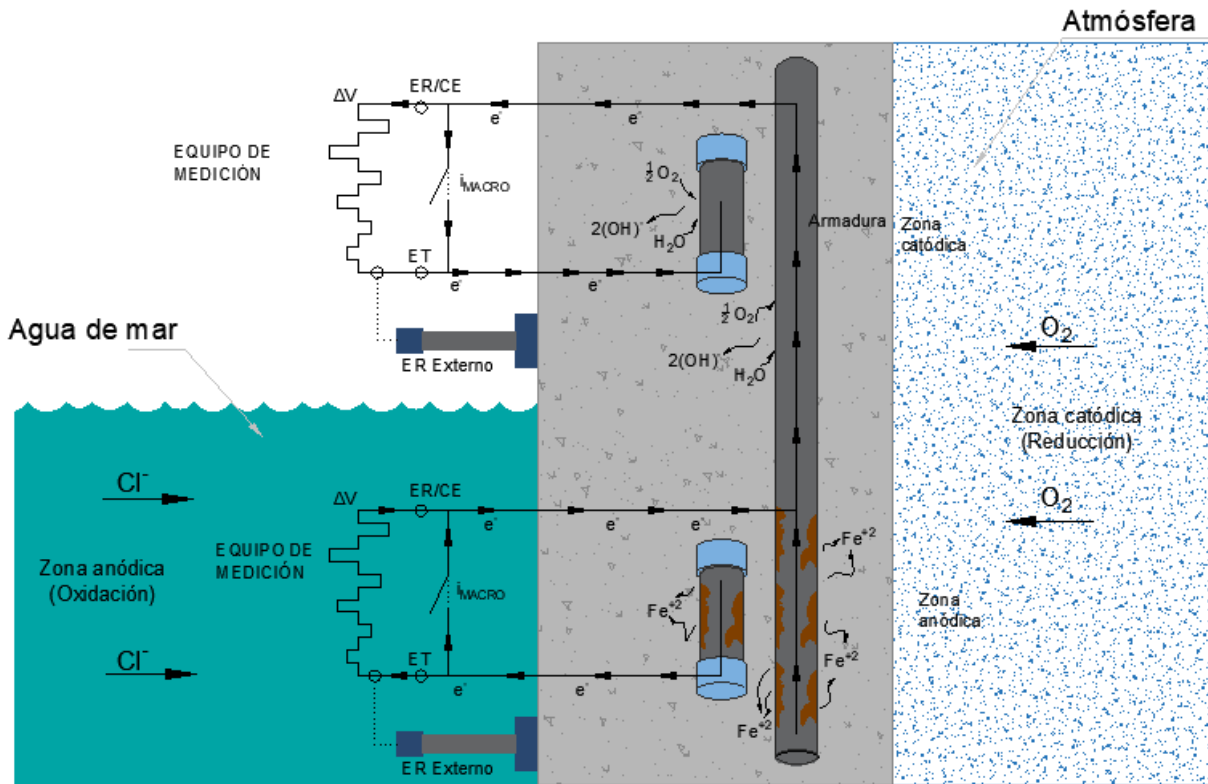


Imagen Nº 32: mecanismo de funcionamiento del sensor

FUENTE: Elaboración propia

La toma de medidas requiere realizarse sobre el sensor aislado de la armadura ya que se debe conocer la superficie efectiva del electrodo de trabajo (superficie del sensor). Por tanto, la medida que se obtiene corresponde a la intensidad de corrosión local ($i_{CORR,local}$), la cual depende de las condiciones del entorno fisicoquímico donde se encuentra. Esta afirmación choca de lleno con la descripción realizada en las corrientes de macrocelda, ya que el método de medida propuesto no tiene en cuenta el valor de $i_{CORR,macro}$.

Los trabajos presentados por diferentes autores han demostrado que la corrosión real a la que se ve sometido un elemento del armado corresponde a la suma de ambos parámetros según (Sohail, Laurens, Deby, & Balayssac, 2015):

$$i_{CORR} = i_{CORR,macro} + i_{CORR,local}$$

Por tanto, la toma de medidas realizada mediante el sistema INESSCOM no representa realmente la intensidad de corrosión del sensor, sino un valor aproximado, lo que condiciona su fiabilidad.

Debido a todo esto, el objetivo de este trabajo fue analizar en un caso real a escala la importancia de las corrientes de macroceldas en la determinación de la intensidad de corrosión total, con el fin de demostrar la necesidad de tenerse



en cuenta en un sistema de sensores como el propuesto (INESSCOM). En el siguiente capítulo se describen las probetas de hormigón armado fabricadas y monitorizadas durante aproximadamente 1 año para evaluar los fenómenos de corrosión total, tanto local como por macrocelda.

CAPÍTULO 3: PLAN EXPERIMENTAL

Una vez comprendido el fenómeno de la corrosión en las estructuras de hormigón armado y la situación actual en lo que respecta a las técnicas de medida y monitorización del fenómeno, se ha demostrado la escasa consideración de los sistemas actuales en lo que respecta a las corrientes de macrocelda. A continuación, se detalla el modelo de probeta que se diseñó para comprobar experimentalmente la trascendencia de este fenómeno en la corrosión total. Se trata de dos losas de hormigón armado con diferentes sensores embebidos y que simulan las condiciones reales a las que se ven expuestos este tipo de elementos en estructuras reales.

3.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este apartado se explican el conjunto de procesos que permitieron mediante la observación, la generación de datos y el análisis, llevar a cabo la validación de la importancia de la corriente de macrocelda dentro del cálculo de la corrosión total:

1. construcción de dos losas de hormigón armado con sensores embebidos y probetas para la caracterización del hormigón utilizado;
2. caracterización del material mediante ensayos para definir características más importantes del hormigón;
3. monitorización de la corrosión local, de macrocelda y total en las losas de hormigón armado. Este punto se dividió en tres etapas:
 - etapa 1: monitorización de los sensores en estado pasivo. Al finalizar, montaje de un depósito para la someter localmente a la losa a un ambiente agresivo de las losas con agua de mar;
 - etapa 2: monitorización de la intensidad de corrosión local hasta la detección de la despasivación de los sensores embebidos en las losas;
 - etapa 3: monitorización de los sensores con diferentes configuraciones de macrocelda, variando la relación de superficie ánodo-cátodo;
4. procesado de datos;
5. tabulación y análisis de resultados;
6. conclusiones basadas en la información obtenida.

3.2 LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN

Con el objetivo de monitorizar un caso real de corrosión en hormigón armado donde existan fenómenos de macrocelda, se diseñaron dos losas a escala, con unas dimensiones de 80x32 cm y 11 cm de canto. En cada losa se instalaron una serie de sensores y armaduras que se describen a continuación:

-armado de la losa: cada losa cuenta con el refuerzo de 12 barras de acero (B500SD, $\varnothing 10$ mm) distribuidas de manera idéntica a cada costado de la pieza (6+6). El recubrimiento de las armaduras (respecto a la cara superior-cara de exposición) fue de 5 cm. Cada refuerzo cuenta con una superficie efectiva de 28 cm, y en cada extremo cuenta con un encamisado de PVC relleno de epoxi que se utilizó para fijar el elemento durante el hormigonado y realizar la conexión eléctrica. Este armado se utilizó para establecer diferentes configuraciones de macrocelda y estudiar la influencia del incremento de la ratio cátodo/ánodo en la intensidad de corriente generada;

-barra de acero inoxidable: la barra central de cada losa se fabricó con la misma geometría que las descritas anteriormente, pero en este caso se fabricó con un redondo de acero inoxidable ($\varnothing 10$ mm). Esta barra se utilizó como contra electrodo en las medidas de la intensidad de corrosión local (técnica utilizada: PSV);

-sensores: en la zona central de cada losa se instalaron dos sensores fabricados con un segmento de armadura de acero al carbono (B500SD, $\varnothing 10$ mm). En cada losa la posición de los sensores guardó distintas configuraciones: en la losa 1 los sensores tienen 5 cm y 2.5 cm de recubrimiento respecto a la cara superior y en la losa 2, uno de los sensores fue colocado guardando un recubrimiento de 7.5 cm mientras que el restante mantuvo un recubrimiento de 5 cm.

En la Imagen 33 se recoge un esquema de armado de cada una de las losas.

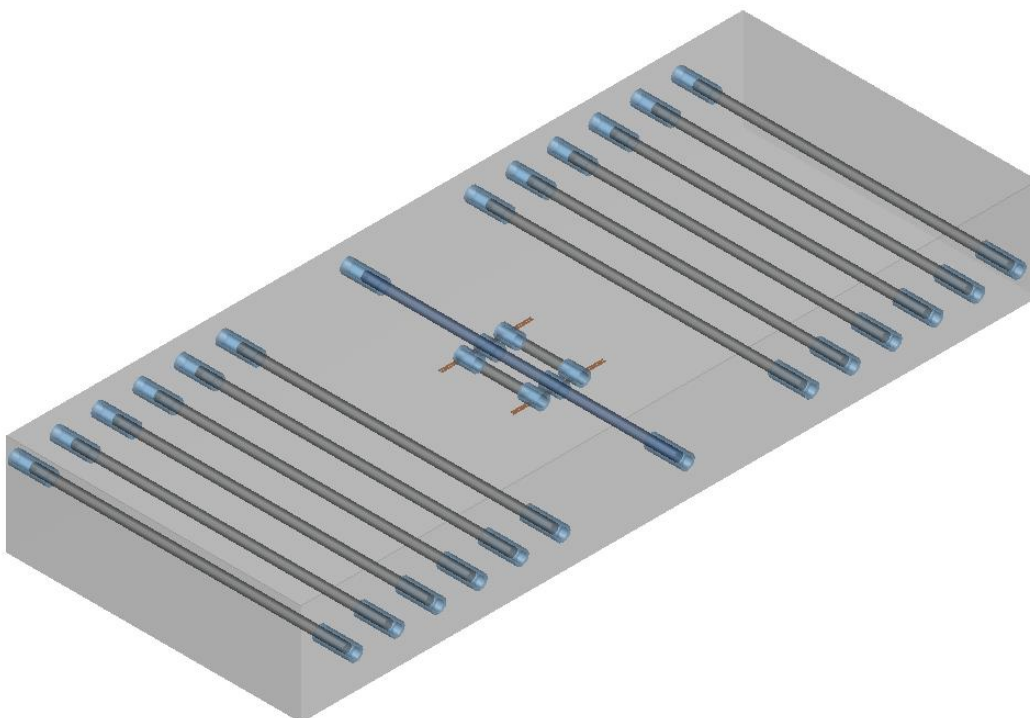
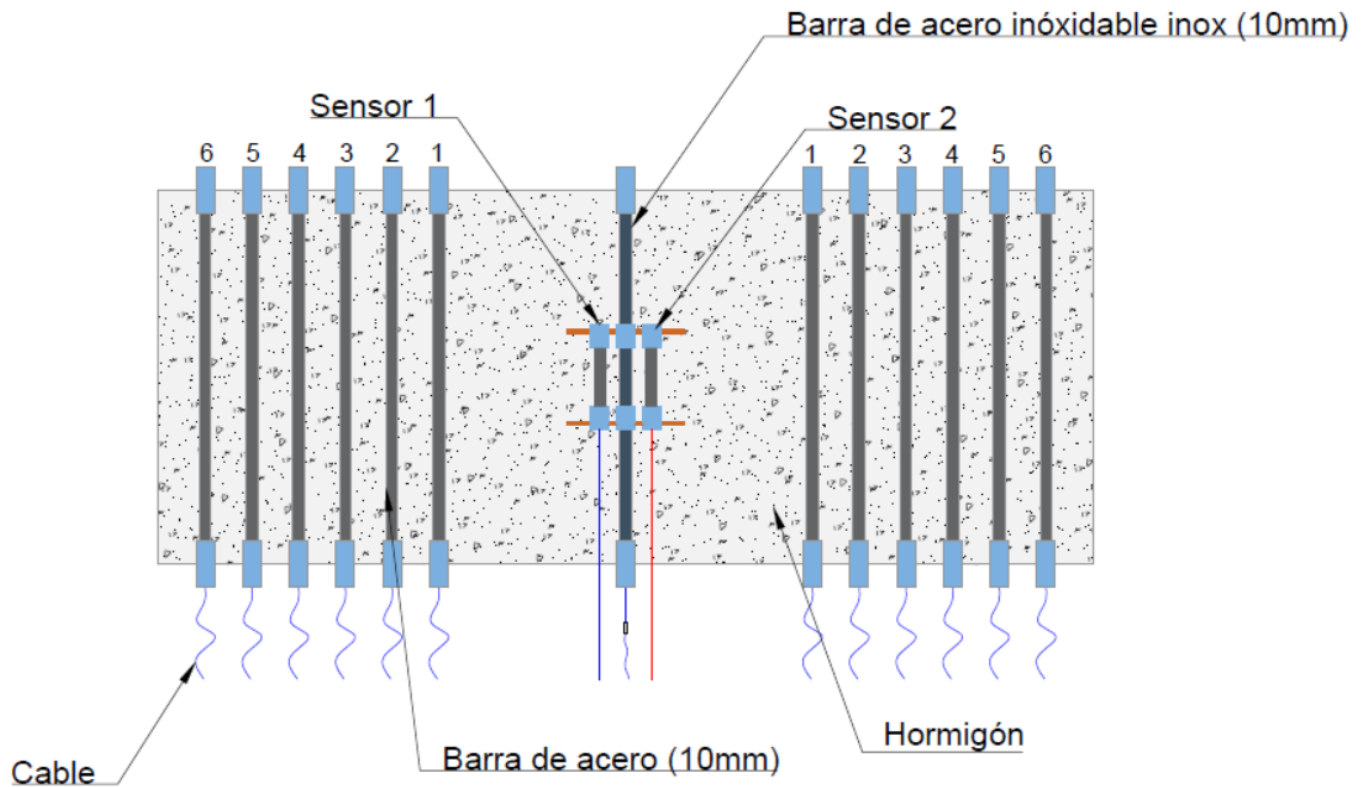


Imagen Nº 33: Distribución de elementos dentro del sistema de monitorización de losas de hormigón armado

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Proceso de fabricación

3.2.1.1. Fabricación de los armados

La primera tarea que se llevó a cabo fue la fabricación de las armaduras auxiliares. Todas las armaduras necesarias se prepararon con barras B500SD de $\varnothing 10$ mm de las dimensiones indicadas en los diagramas presentados en la Imagen 38. Estas piezas se cortaron de armados más grandes con la ayuda de una radial. Una vez cortadas se cepillaron con un cepillo de púas metálico con la finalidad de retirar los posibles óxidos acumulados en la superficie del material durante el acopio. Una vez limpias las muestras se procedió a realizar el encamisado y la conexión eléctrica.

Previo sellado se comprobó que la conexión eléctrica funcionaba con un Multímetro de alta precisión modelo Fluke.

Con el fin de garantizar el completo aislamiento de la conexión se realizó un encamisado de los sensores con un segmento de tubería de PVC ($\varnothing 16$ mm) que se rellenó con resina epoxi (modelo Sikaguard 64) y se selló con masilla elástica (modelo Sikaflex 111). El extremo opuesto de la pieza se protegió del mismo modo, aunque sin conexión eléctrica.

La barra central se fabricó del mismo modo, pero sustituyendo el acero al carbono por un acero inoxidable.

En la Imagen 34 se recogen evidencias fotográficas del proceso de fabricación de estas piezas.



Imagen Nº 34. Fabricación de conexiones eléctricas para armaduras

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2. Fabricación de los sensores

En paralelo a la fabricación del armado auxiliar se fabricaron 4 sensores (dos para cada losa). El proceso de fabricación de los sensores siguió un procedimiento idéntico al de las armaduras auxiliares, con la excepción de sus dimensiones, que se describen en la Imagen 35.

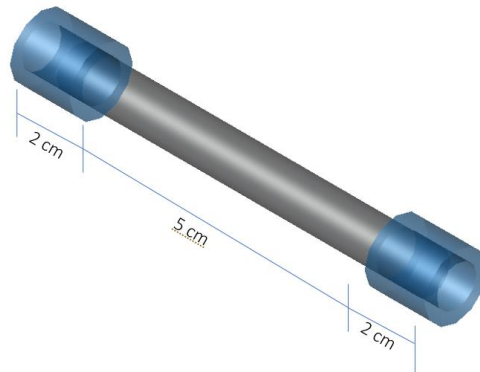


Imagen Nº 35. Dimensiones de sensor tipo.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que conocer la superficie de contacto hormigón-sensor es de vital importancia para el estudio que se recoge en este trabajo, tras finalizar el montaje, los 4 sensores fueron sometidos a un proceso de limpieza con cepillado manual para la retirada de cualquier resto de pintura o producto acumulado sobre la superficie. Conocidas las superficies lineales del sensor (Imagen 35), se calculó la superficie efectiva del mismo según:

$$\text{Longitud} = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Diametro} = 1 \text{ cm}$$

$$\text{Superficie} = 1 \text{ cm} * \pi * 5 \text{ cm}$$

$$\text{Superficie} = 15.71 \text{ cm}^2$$



Imagen Nº 36. Fabricación de sensores

Fuente: Elaboración propia.

Una vez preparado todo el armado necesario para llevar a cabo el montaje de las losas se procedió con la colocación de las armaduras.



Imagen Nº 37. Disposición de armaduras en tablero de encofrado.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3. Fabricación del encofrado y distribución de la armadura

Con la finalidad de mantener en la posición deseada el armado auxiliar (barras auxiliares y pieza central de acero inoxidable) se utilizó un encofrado con tableros de madera (1 cm de espesor). Estas piezas se cortaron con una sierra de calar y fueron las piezas utilizadas como testas transversales. En cada una de las piezas se realizaron 13 orificios como se muestra en la Imagen 38 con

una broca para madera $\text{Ø}16\text{mm}$. En estos orificios se encajaron los tubos de PVC utilizados para la protección lateral de las armaduras.

Una de las ventajas de este método fue la de poder regular con total precisión el recubrimiento de cada barra, en este caso, 5 cm.

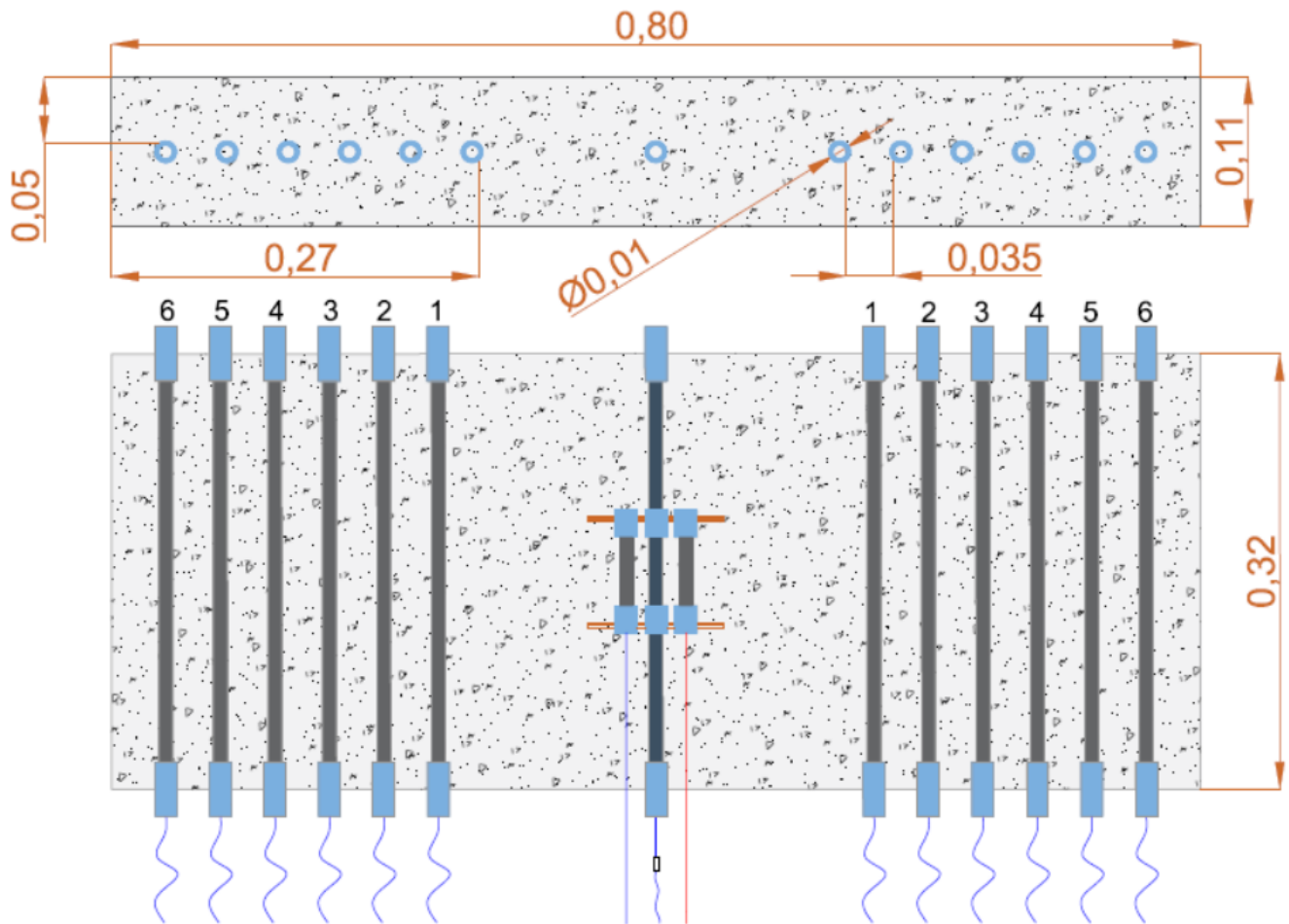


Imagen Nº 38. Planta y perfil de prototipos de ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

Como encofrado lateral se utilizaron perfiles metálicos fijados con gatos para evitar el movimiento de las piezas durante el hormigonado por las tensiones que se pudieran generar.



Imagen Nº 39. Losas de hormigón en encofrado metálico

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.4. Colocación de los sensores

La colocación de los sensores se realizó a posteriori del montaje de las barras auxiliares. Las piezas utilizadas como sensor se colocaron con la ayuda de piezas de plástico (no conductoras) diseñadas y fabricadas mediante impresión 3D en el Laboratorio de Electroquímica de la ETSIE.

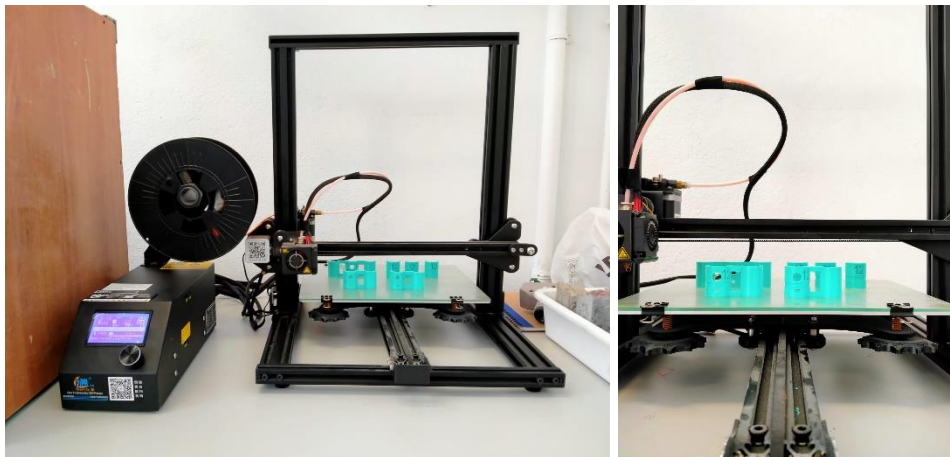


Imagen Nº 40. Impresión 3D de soportes para sensores.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso y para cada losa se utilizaron piezas diferentes con la finalidad de localizar los sensores con distintos recubrimientos. Los sensores ubicados en la losa 1 guardan recubrimientos de 5 cm y 2.5 cm respecto a la cara superior de la losa. Mientras que los recubrimientos que manejan los sensores en la losa 2 son de 7.5 cm y 5 cm. El detalle de ambas configuraciones se muestra en la Imagen 41.

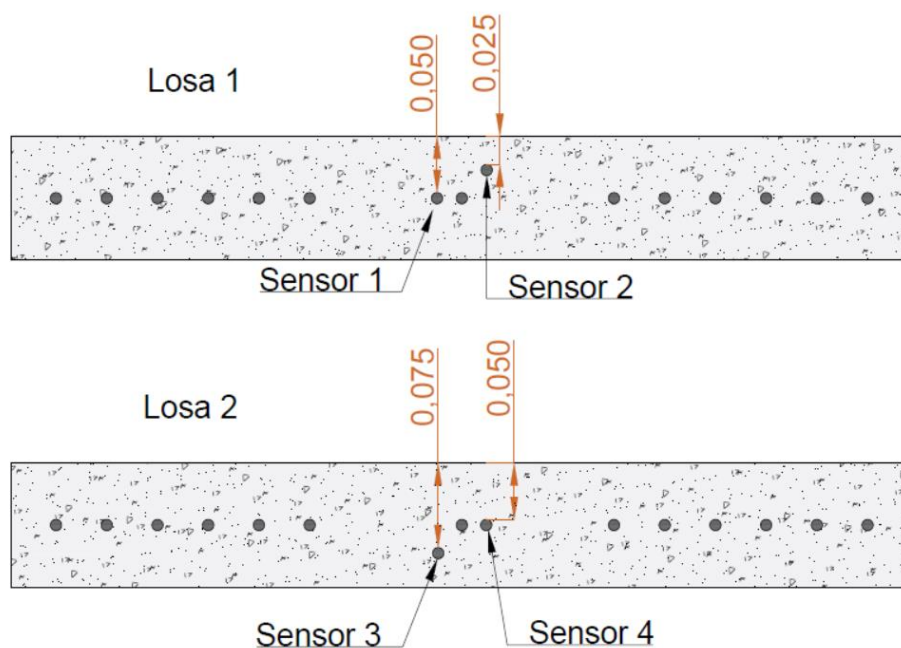
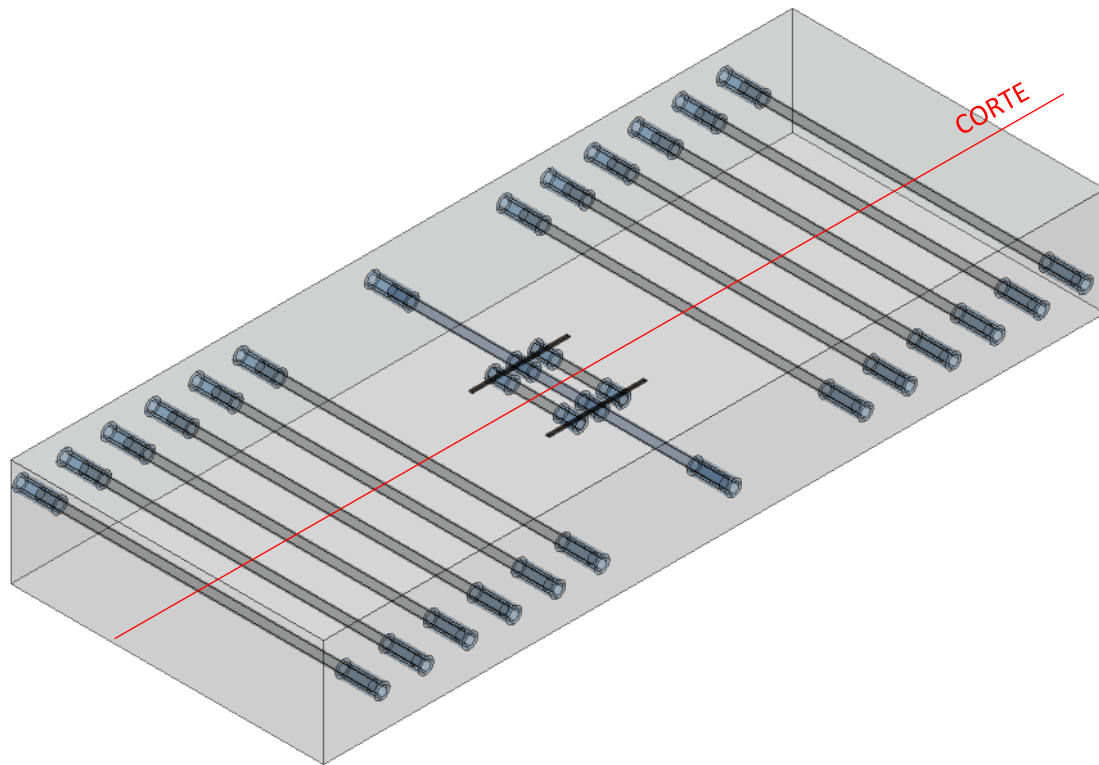


Imagen Nº 41. Vista en perfil de la ubicación de los sensores.

Fuente: Elaboración propia.

La principal ventaja del prototipo diseñado fue la no conexión eléctrica entre los distintos elementos. Como se ha podido apreciar en los diagramas

presentados en este apartado, cada elemento cuenta con su cableado al exterior de la pieza, lo que permitió durante el periodo de monitorización generar distintas configuraciones eléctricas del armado y estudiar una gran variedad de posibilidades.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

3.3.1 Dosificación

Para la construcción de las losas de hormigón que se utilizaron como muestras para la monitorización se preparó un hormigón convencional, con una relación agua/cemento de 0.65. La dosificación utilizada para la fabricación de un m³ hormigón se recoge en la tabla 4.

Tabla 4: Dosificación del hormigón kg/m³ de hormigón

COMPONENTES	CANTIDAD
CEM II /B-L 32,5N	301.5 Kg
Agua	195 L
Superplastificante	1.85 kg
Grava 4/12	490.78 Kg
Arena 0/4	1438.15

Fuente: Elaboración propia

Se trata de un hormigón convencional aceptado por las normativas existentes, pero que, sin embargo, no cuenta con las propiedades óptimas para favorecer la durabilidad. La utilización de este tipo de hormigón permitió acelerar los procesos en la investigación, pero, además, sirve para comprender muchos de los problemas de las obras existentes, la mayoría de las cuales se fabricaron con este tipo de material.

3.3.2 Hormigonado

La preparación del armado se realizó en los laboratorios de electroquímica y de materiales de la ETSIE, pero la construcción de las losas de hormigón armado se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Ciencia y tecnología del Hormigón (ICITECH-UPV). Este espacio cuenta con una amasadora de gran capacidad y herramientas para desplazar elementos pesados como las losas fabricadas.

La fabricación del hormigón se realizó con una amasadora de 500 litros (se fabricaron 400) ya que en el amasado se prepararon muestras para otros

ensayos paralelos llevados a cabo por los miembros del grupo de investigación en el que los cotutores de este trabajo participan.

La primera labor que se llevó a cabo fue el pesado de todos los materiales, la preparación del espacio para hormigonar y la revisión de todos los armados para asegurar su correcta posición. En la Imagen 42 se muestran algunas imágenes del proceso.



Imagen Nº 42. Actividades previas al hormigonado.

Fuente: Elaboración propia.

Junto con la fabricación de la losa, y para la caracterización del material se prepararon para el hormigonado una serie de moldes para la preparación de probetas. El conjunto de muestras que se prepararon y fabricaron se detalla en la tabla 5.

Tabla 5. Muestras para ensayos de caracterización.

ENSAYO	PROBETA	CANTIDAD
Resistencia a compresión	Ø10x20 cm	12
Capilaridad	10x10x5 cm	6
Absorción - Porosidad	10x10x5 cm	24
Resistividad	4x4x16 cm	6
Migración Cl-	Ø10x20 cm	6

Fuente: Elaboración propia

Una vez preparado todo el material se procedió a la fabricación del hormigón. En la Imagen 43 se muestran imágenes de todo el proceso.



Imagen Nº 43. Procedimiento de amasado.

Fuente: Elaboración propia.

Tras el hormigonado, tanto las losas como las probetas destinadas a ensayos de caracterización se cubrieron con láminas de polietileno. La finalidad de esta medida fue evitar la pérdida excesiva de humedad que modificara las propiedades del hormigón hacia un resultado no deseado. Estas condiciones de mantuvieron durante 48 días (almacenado en condiciones de laboratorio: 23±2

°C y H.R. 65%). Tras este periodo se procedió al desmoldado de las probetas y las losas, que se trasladaron a las instalaciones de la ETSIE. Las probetas pequeñas se almacenaron en cámara de curado hasta cumplir la edad de 28 días (20 ± 2 °C y H.R. >90%). Las losas, por su parte, y por problemas de peso y espacio se almacenaron en el laboratorio de electroquímica, pero protegidas con telas y humectadas constantemente para simular un curado en cámara con una humedad lo más alta posible. Este proceso también se extendió hasta la edad de 28 días.

3.4. TRABAJOS PREVIOS A LAS MEDIDAS DE CORROSIÓN

3.4.1. Acondicionamiento de la losa

Tras el periodo de curado se realizó una revisión detallada de todo el cableado. Durante esta revisión se procedió a la reparación de algunas conexiones dañadas durante el proceso de desencofrado, momento más crítico por la configuración utilizada. Además, se procedió al marcado de los cables con cinta termo-retráctil para poder identificar con facilidad cada elemento embebido.

El proceso de reparación se extendió durante más de una semana, periodo durante el cual se continuó con la humectación superficial de la losa, tal y como se muestra en la Imagen 44.



Imagen Nº 44. Fotografía losas de hormigón armado en laboratorio de electroquímica

Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO 4: MEDIDAS

En este apartado se describen los procedimientos de ensayo llevados a cabo para realizar la caracterización del hormigón utilizado para la fabricación de las losas, así como las metodologías empleadas para la monitorización de la corrosión en las muestras fabricadas.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Con la finalidad de conocer los parámetros intrínsecos relacionados con la durabilidad del hormigón fabricado se llevaron a cabo una serie de ensayos. Todos los ensayos presentados en los siguientes apartados se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en las distintas normas citadas.

Las probetas sobre las que se realizó el ensayo fueron fabricadas al mismo tiempo que las losas, y su desmoldado se realizó a las 48 horas de su fabricación. Tras estos dos días de curado en el molde y en condiciones de laboratorio (23 ± 2 °C y H.R. 65%), las probetas se almacenaron en cámara de curado (20 ± 2 °C y H.R. >90%) hasta cumplir la edad de 28 días.

4.1.1. Resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón fabricado se siguió el procedimiento establecido en la norma UNE 12390-3 (UNE, 2009) "Determinación a la resistencia a la compresión de probetas". El ensayo se realizó sobre probetas cilíndricas ($\varnothing 10$ cm; altura 20 cm) a las edades de 3, 7, 28 y 56 días. Previamente a cada ensayo las probetas fueron acondicionadas mediante el pulido de las bases con una pulidora modelo Ibertest PPAM-150-1. El ensayo se realizó con una prensa modelo Ibertest MEH-1500SW. Los resultados presentados corresponden a la media obtenida de la rotura de 3 probetas por cada edad de ensayo.

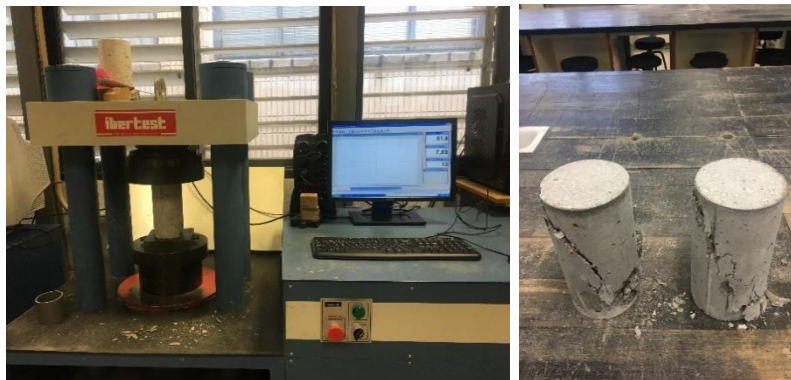


Imagen Nº 45. Ensayo de resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Porosidad accesible al agua

La determinación de la porosidad accesible al agua se realizó siguiendo la norma de ensayo UNE 83980 (UNE, 2014) “Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón”. El procedimiento descrito en dicho método de ensayo se basa en el estudio de la variación de pesos tras someter las muestras a un ciclo de saturación con agua. La diferencia de pesos entre la muestra seca (acondicionada a 105°C) y el ciclo de saturación se utiliza para obtener el % de porosidad accesible que presenta una muestra según las ecuaciones presentadas en dicha norma. Este ensayo se realizó a los 14, 28 días y a los 2 y 6 meses de edad sobre 6 probetas prismáticas 10x10x5 cm. Los resultados presentados corresponden a una media de los valores obtenidos.



Imagen Nº 46. Ensayo de absorción de agua, densidad y porosidad.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se llevó a cabo según el procedimiento establecido por la norma UNE 83982 (UNE, 2008) “Determinación por capilaridad de agua del hormigón endurecido – método de Fagerlund” y siguiendo las especificaciones de acondicionamiento de las probetas según la norma UNE 83966 (UNE, 2008) “Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad”. El ensayo se realizó a los 2 y 6 meses de edad sobre 6 probetas prismáticas 10x10x5 cm. Los resultados presentados corresponden a una media de los valores obtenidos.



Imagen Nº 47. Ensayo de absorción de agua por capilaridad.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Migración de cloruros

Para determinar el coeficiente de migración de los cloruros en el hormigón fabricado se siguió el procedimiento establecido en la norma NT BUILD 492 (NT BUILD 492, 2008) "Coeficiente de migración de cloruros para experimentos de migración en estado no estacionario". Los estándares de medida españoles no recogen una norma que permita estudiar mediante el método acelerado de migración el coeficiente de difusión del hormigón, por lo que se recurrió al estándar nórdico, más utilizado para el análisis de este parámetro.

Este ensayo consiste en forzar el paso de cloruros a través de una muestra ($\varnothing 10$ cm; altura 5 cm) mediante el uso de corriente eléctrica. Tras un periodo de exposición, determinado según el material y de acuerdo con las tablas de ensayo, se puede calcular el coeficiente de difusión en estado no estacionario por migración (D_{nssm}). Para conocer el avance del frente de cloruros, tras el ensayo se deben abrir las muestras mediante un ensayo de tracción indirecta y realizar un revelado con nitrato de plata (0.1 M $AgNO_3$) (Imagen 48). Este ensayo se realizó sobre 3 probetas ($\varnothing 10$ cm; 5 cm) a los 2 y 6 meses de edad. Los resultados presentados corresponden a una media de los valores obtenidos.

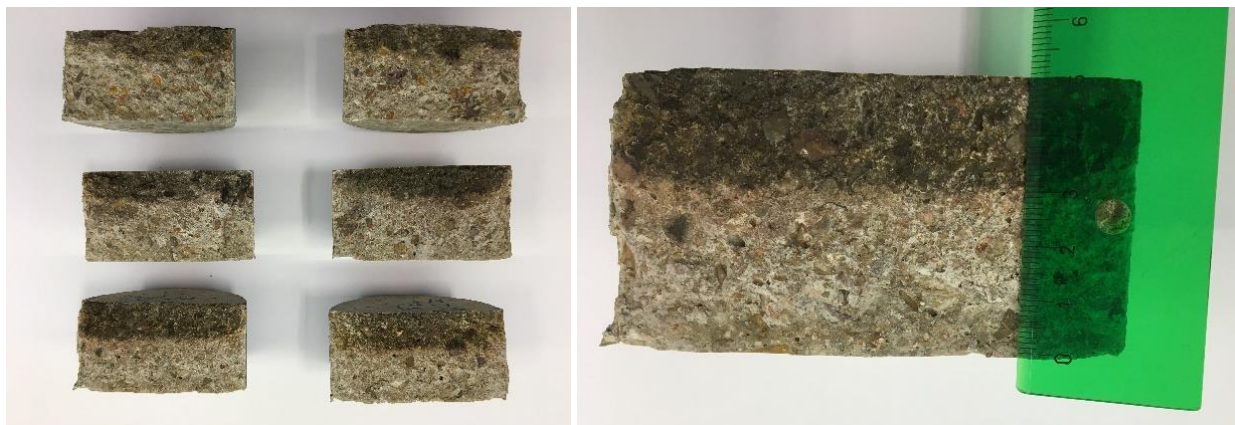


Imagen Nº 48. Ensayo de migración de cloruros

Fuente: Elaboración propia.

4.2. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO

Las medidas realizadas sobre la losa que corresponden al periodo de seguimiento de los procesos de corrosión desarrollados en las piezas se extendieron durante casi un año. Durante dicho tiempo, la configuración de los 4 sensores embebidos en las losas se detalla en la Imagen 49. El sensor 1 de cada

losa se mantuvo durante todo el periodo aislado (Sensores 1 y 3). El sensor 2 de cada losa (sensores 2 y 4) fueron conectados a las armaduras auxiliares mediante el cableado externo y de acuerdo con las configuraciones que se describen más adelante. De este modo, 2 sensores mantuvieron durante todo este tiempo un estado de aislamiento respecto al resto de las armaduras, mientras que otros dos se vieron sometido a fenómenos de macrocelda como consecuencia de la conexión eléctrica con otras armaduras.

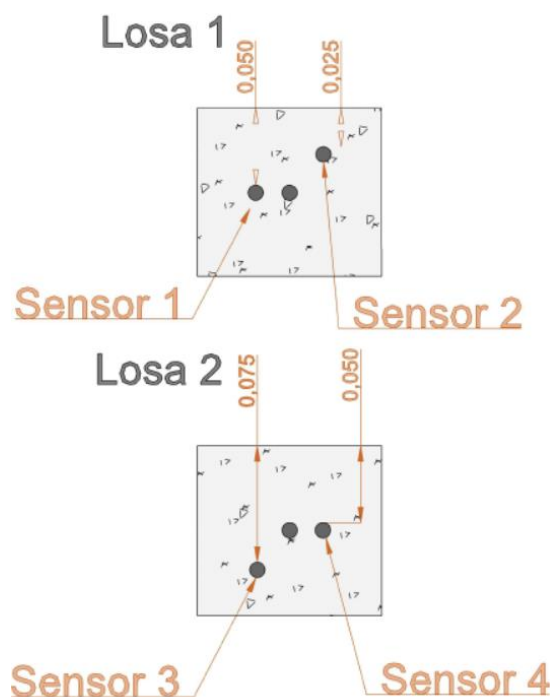


Imagen Nº 49. Configuración sensores. Losa 1, S1 y S2, losa 2, S3 y S4

Fuente: Elaboración propia.

El periodo de monitorización se extendió durante más de 200 días y se dividió en tres etapas que a continuación se detallan.

4.2.1 Etapa 1

En la primera etapa se realizó una monitorización del estado de las losas tras el periodo de curado, y que se extendió durante 3 semanas. Durante este tiempo se midió la corrosión en los sensores bajo distintas configuraciones que se detallan en la tabla 6 y se muestran en la Imagen 50 (esta configuración solo afecta a los sensores 2 y 4 ya que los sensores 1 y 3 permanecieron constantemente desconectados del armado auxiliar).

Tabla 6. relación de cátodo/ánodo etapa 1

Configuración	Conexión	Relación Cátodo/Ánodo
0	-	-
1	Nivel de armado auxiliar 1	11.20
2	Nivel de armado auxiliar 1 y 2	22.40
3	Nivel de armado auxiliar 1 a 3	33.60
4	Nivel de armado auxiliar 1 a 4	44.79
5	Nivel de armado auxiliar 1 a 5	55.99
6	Nivel de armado auxiliar 1 a 6	67.19

FUENTE: elaboración Propia.

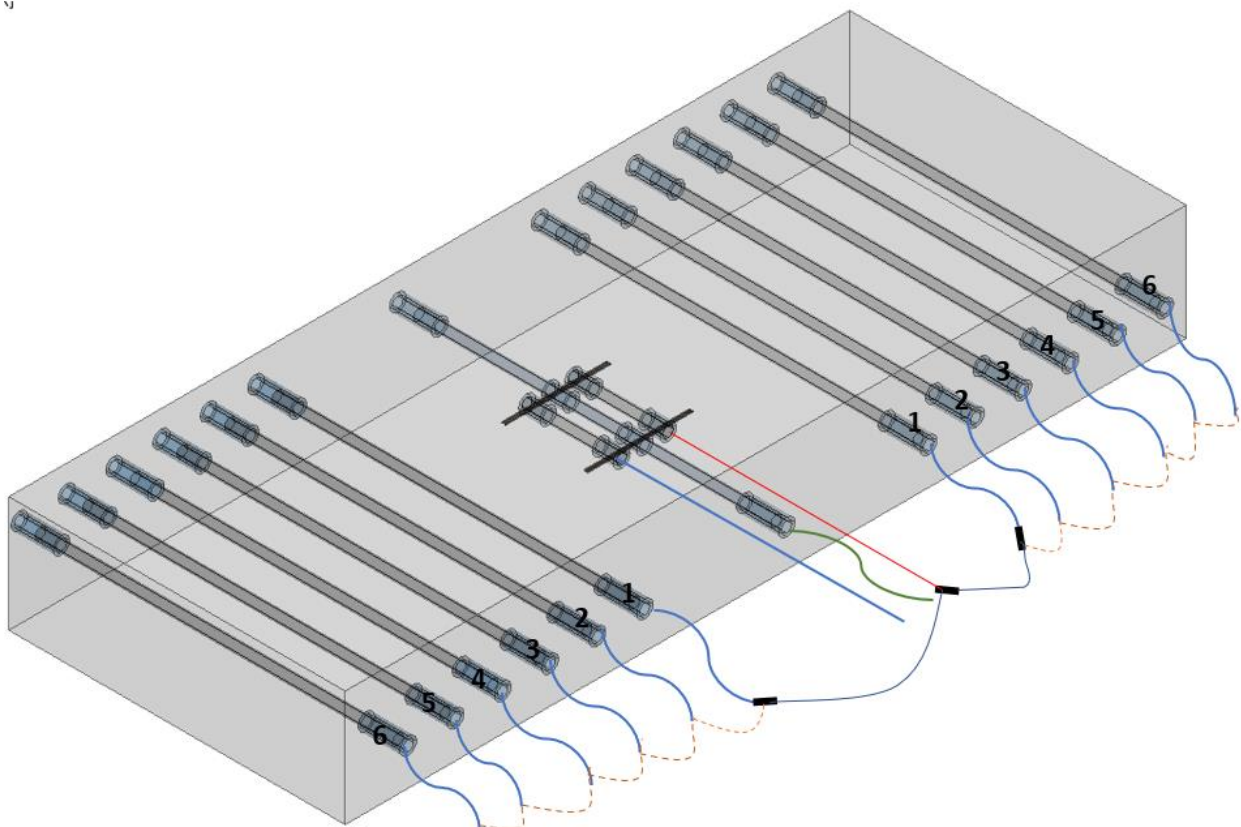


Imagen Nº 50. Conexiones entre niveles de armadura y sensor 2 ó 4

Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las configuraciones, las cuales se mantuvieron durante 2 días cada una se midió la corrosión total de cada sensor siguiendo el procedimiento:

1º Medida de la intensidad de macrocelda ($i_{CORR,macro}$). Para la determinación de la intensidad de corriente de macrocelda se utilizó un amperímetro de resistencia casi nula (ZRA), modelo Keithley TEKtronix 2000. Esta medida se realizó conectando el sensor correspondiente (ánodo) al polo negativo del amperímetro y el armado auxiliar de cada configuración al polo positivo.

En la siguiente Imagen se muestran evidencias fotográficas de este proceso:



Imagen Nº 51. Medida de la intensidad de macrocelda con amperímetro de resistencia casi nula (ZRA)

Fuente: Elaboración propia.

2º Medida de la intensidad de corrosión local ($i_{CORR,local}$). Para la determinación de la intensidad de corrosión local se utilizó un potencióstato/galvanostato modelo AutoLab PGSTAT1000 y la técnica de

medida PSV (ver apartado 2.6.2.3.). La configuración de celda para la medida que se utilizó fue de 3 electrodos, compuesta por:

- electrodo de trabajo: cada uno de los sensores analizados;
- electrodo de referencia: un electrodo de calomelanos saturado (SCE) en contacto con el hormigón mediante la ayuda de una esponja húmeda;
- contraelectrodo: barra de acero inoxidable de cada losa.



Imagen Nº 52. conexiones ensayo PSV medida de i_{local} etapa 1

Fuente: Elaboración propia.



Imagen Nº 53. conexiones ensayo PSV medida de i_{local} etapa 2

Fuente: Elaboración propia.

3º Medida de la intensidad de corrosión total (i_{CORR}). Tal y como se describió en el apartado 2.6.2.1., la corrosión total que afecta a un elemento embebido en hormigón armado corresponde a la suma de las corrientes de corrosión local (debido al entorno fisicoquímico de la armadura) y de macrocelda (a causa de la conexión entre distintas zonas del armado).

$$i_{CORR} = i_{CORR,macro} + i_{CORR,local}$$

Con los datos de $i_{CORR,macro}$ e $i_{CORR,local}$ se calculó la i_{CORR} para cada sensor. Una vez finalizó el reconocimiento del estado cinético de cada sensor tras el curado se expusieron las losas a una contaminación parcial con cloruros, tal y como se define en la etapa 2.

4.2.2 Etapa 2

Para llevar a cabo la contaminación parcial de las losas se realizó un montaje por depósito o “ponding” de agua con cloruros. El objetivo de este procedimiento fue inducir a la despasivación de los sensores y obtener intensidades de corrosión altas y, de este modo, estudiar los fenómenos de macrocelda cuando el sensor se encuentra en estado activo de corrosión. Para la fabricación de este depósito se cortaron dos secciones de 42cm de tubería de PVC de 16 cm de diámetro con la sierra mecánica del laboratorio de materiales de la ETSIE-UPV (Imagen 54).



Imagen Nº 54. Fotografías corte de tuberías de PVC.

Fuente: Elaboración propia.

Para el montaje se sometió la losa a un secado superficial (había estado constantemente humedeciéndose la superficie) con un radiador eléctrico. Una vez seca la superficie se limpió para retirar los restos de polvo presentes.



Imagen Nº 55. Fotografías de la limpieza de losa para garantizar adherencia de pondeo de tuberías de PVC.

Fuente: Elaboración propia.

La instalación de las tuberías de PVC sobre cada una de las losas se realizó con un polímero sellante (Sikaflex 111). Este sellado se aplicó en varias capas, con el fin de asegurar la adherencia entre elementos y evitar así pérdidas de agua. En la Imagen 56 se muestra este proceso.



Imagen Nº 56. Fotografías corte de tuberías de PVC.

Fuente: Elaboración propia.

El adhesivo se dejó secar durante 48 horas, momento en el que el depósito fabricado se rellenó con una disolución con cloruros, en este caso una solución 0.5M de NaCl (condiciones similares al agua del mar mediterráneo). La Imagen 57 muestra imágenes del proceso.

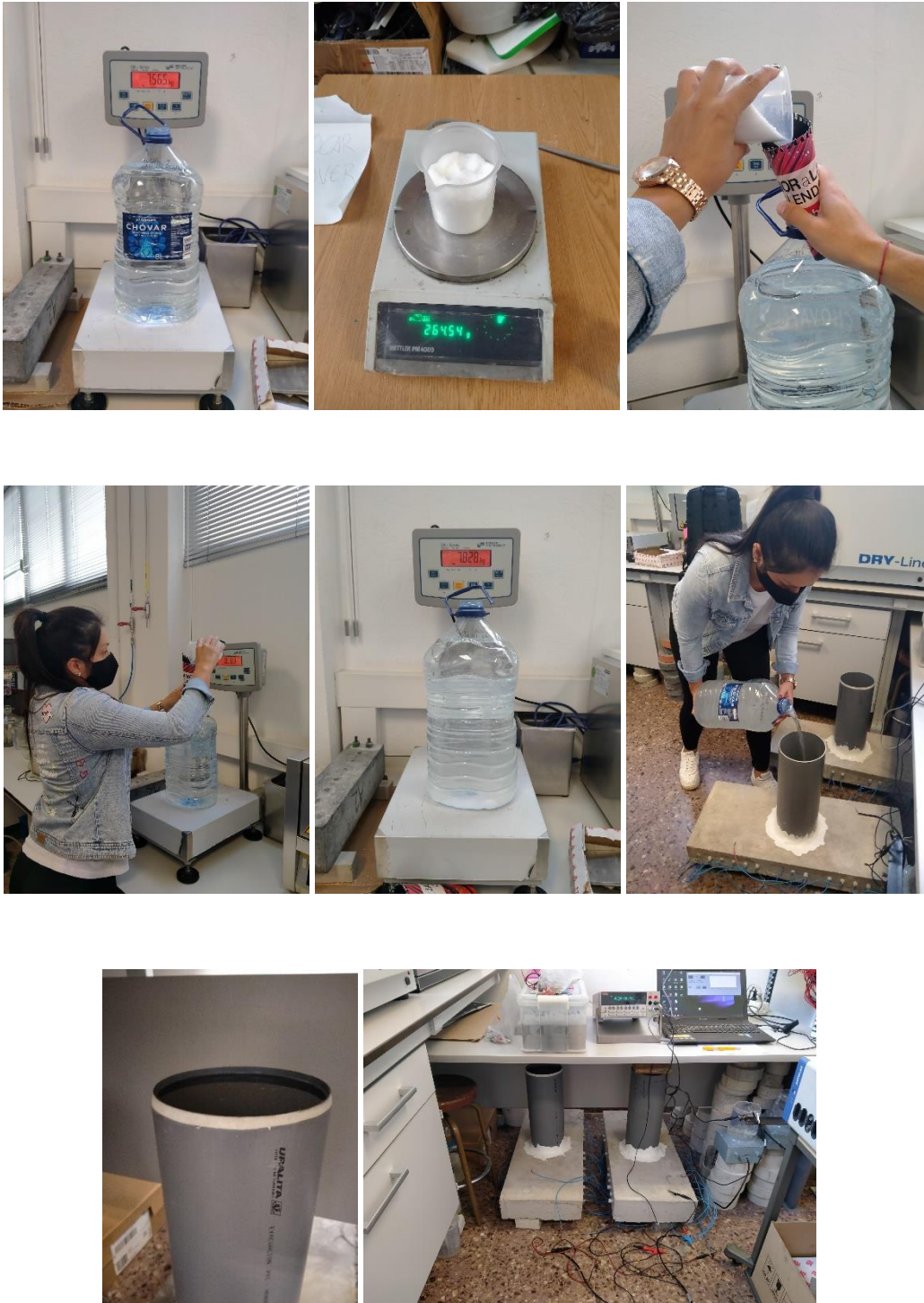


Imagen Nº 57. Pounding con concentración de cloruros

Fuente: Elaboración propia.

En el apartado 2.4.4.1. se presentó el ion cloro como un agente despasivante desencadenante de la corrosión. Durante esta segunda etapa se realizó un seguimiento únicamente de la corrosión local ($i_{CORR,local}$) para estudiar el estado de los sensores y apreciar los fenómenos de despasivación que se puedan producir. A diferencia de la monitorización de este parámetro descrita en la etapa 1, el electrodo de referencia se introdujo en la disolución, por lo que ya no se utilizó la humectación superficial para favorecer el contacto del electrodo y la superficie de hormigón.

Esta etapa se extendió durante más de 100 días, ya que fue cuando se detectaron cambios en el comportamiento de los diferentes sensores.



Imagen Nº 58. Electrodo de referencia, conexión a las losas etapa 1 y etapa 2

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Etapa 3

La última etapa de la monitorización se inició cuando se detectaron niveles de corrosión por encima de $0.1 \mu A/cm^2$ en tres de los cuatro sensores, valor considerado como referencia para identificar la despasivación de las armaduras si se observa el valor indicado se mantiene o aumenta a lo largo del tiempo.

Esta tercera etapa consistió en el seguimiento durante casi 100 días más la corrosión total de los sensores siguiendo una configuración similar a la descrita en la etapa 1.

Tabla 7. Relación de cátodo/ánodo etapa 2

Configuración	Conexión	Relación Cátodo/Ánodo
0	-	-
1	Nivel de armado auxiliar 1	11.20
2	Nivel de armado auxiliar 1 y 2	22.40
3	Nivel de armado auxiliar 1 a 3	33.60
4	Nivel de armado auxiliar 1 a 4	44.79
5	Nivel de armado auxiliar 1 a 5	55.99
6	Nivel de armado auxiliar 1 a 6	67.19
6	Nivel de armado auxiliar 1 a 6	67.19
5	Nivel de armado auxiliar 1 a 5	55.99
4	Nivel de armado auxiliar 1 a 4	44.79
3	Nivel de armado auxiliar 1 a 3	33.60
2	Nivel de armado auxiliar 1 y 2	22.40
1	Nivel de armado auxiliar 1	11.20
0	-	-

FUENTE: Elaboración propia

Los sensores 1 y 3 permanecieron durante todo el proceso aislados del armado auxiliar mientras que los sensores 2 y 4 adoptaron las configuraciones descritas en la tabla 7 y apreciables en los diagramas de la Imagen 59. Cada configuración se mantuvo durante 1 semana y las medidas tanto de la ($i_{CORR,macro}$) como de la ($i_{CORR,local}$) se realizaron diariamente.



Imagen Nº 59. Electrodo de referencia, conexión a las losas

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

En este capítulo se recogen los resultados de los ensayos llevados a cabo para caracterizar el hormigón con el que se fabricaron las losas. En la segunda parte de este apartado también se presentan los resultados obtenidos durante el periodo de seguimiento y monitorización de la corrosión sobre las propias losas de hormigón armado fabricadas.

5.1. RESULTADOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados para caracterizar el hormigón y conocer las propiedades mecánicas y de durabilidad se presentan a continuación. Este apartado se ha dividido por ensayos y con una discusión final donde se sintetizan todos los resultados.

5.1.1 Resistencia a compresión

La Imagen 60 muestra la evolución de la resistencia a compresión del hormigón fabricado. Durante los primeros 7 días el hormigón alcanzó una gran resistencia, a partir de este momento siguió incrementando, pero de una manera más reducida. A los 28 días los valores obtenidos superaron los 30 MPa. Este material presenta una resistencia típica de los hormigones fabricados actualmente en edificación.

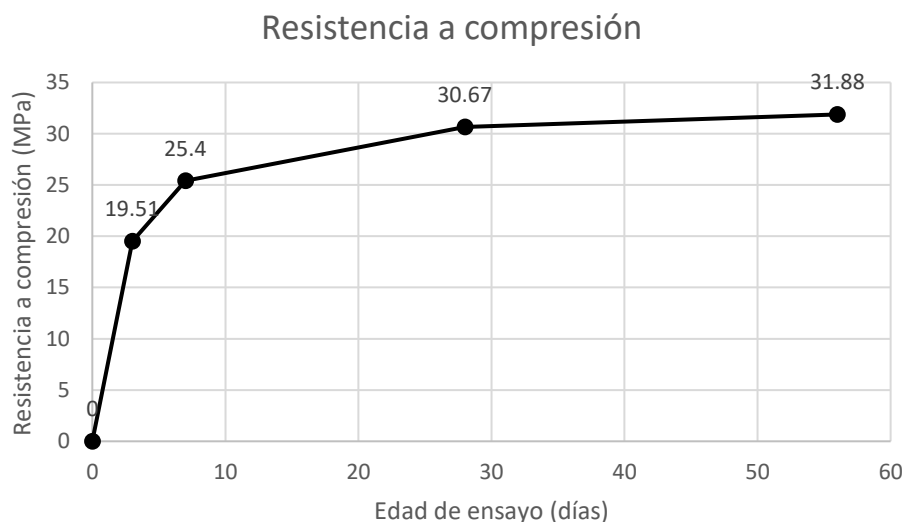


Imagen Nº 60. Evolución de la resistencia a compresión

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Porosidad accesible al agua

La porosidad accesible al agua es un indicador del grado de resistencia de un hormigón a la penetración de agentes agresivos como los cloruros. En la Imagen 61 se muestra el valor obtenido para este parámetro a distintas edades.

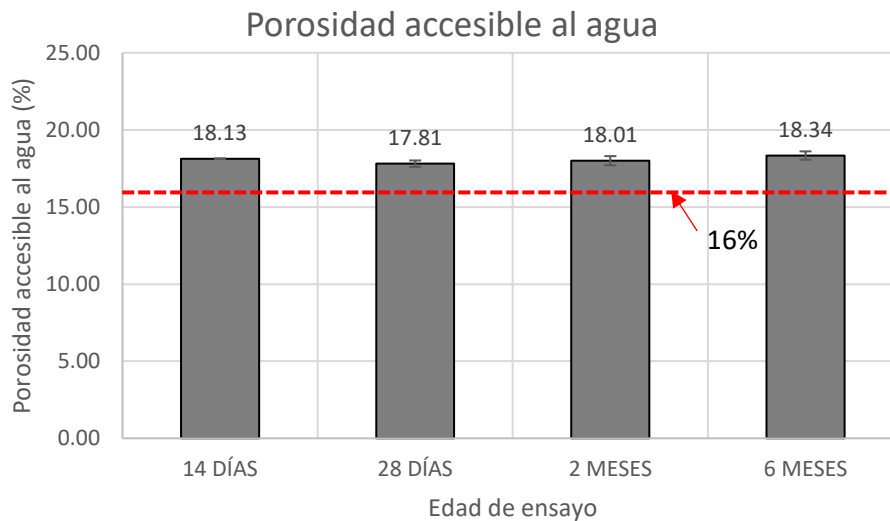


Imagen Nº 61. Comportamiento de la porosidad en el tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos muestran un índice de durabilidad muy bajo si se comparan con los indicadores propuestos por otros autores como Baroghel-Bouny (Baroghel-Bouny, 2004), quien establece un valor del 16% como umbral crítico (marcado en la Imagen 61).

5.1.3 Absorción por capilaridad

La absorción por capilaridad está relacionada con la porosidad accesible al agua y guarda estrecha relación con la resistencia a la penetración de agentes agresivos como los cloruros. En la tabla 8 se presentan los valores obtenidos a las dos edades a las que se llevó a cabo el ensayo.

Tabla 8. Resultados absorción por capilaridad.

Ensayo	Edad	2 meses	6 meses
Capilaridad (kg/m ² min ^{0.5})		72.75	70.36

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Coeficiente de difusión por migración

El estudio del coeficiente de difusión por migración sirvió como una herramienta acelerada para comprender la resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros. En la tabla 9 se muestran los valores promedio obtenidos a las dos edades de ensayo.

Tabla 9. Coeficientes de difusión obtenidos a partir del ensayo de migración

Ensayo	Edad	2 meses	6 meses
D_{nssm} (m ² /s)		5.3843E-11	5.121E-11

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos volvieron a superar el umbral establecido por Baroguel-Bouny (Baroghel-Bouny, 2004) que estableció un umbral crítico de 50×10^{-12} m²/s máximo, a partir del cual se considera un hormigón de muy baja durabilidad.

5.1.5 Síntesis de los resultados de caracterización

El conjunto de ensayos obtenidos, el cual queda sintetizado en la tabla 10 permitió comprender la capacidad mecánica del hormigón y su posible respuesta en un medio agresivo.

Tabla 10. Resumen de resultados

ENSAYO		EDAD DE LAS PROBETAS DE ENSAYO					
		3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	2 MESES	6 MESES
RESISTENCIA A COMPRESIÓN	Mpa	19.51	25.4		30.67	31.88	
POROSIDAD ACCESIBLE	%			18.13	17.81	18.01	18.34
COEFICIENTE DE CAPILARIDAD K	kg/m ² min ^{0.5}					72.75	70.36
MIGRACIÓN	m ² /s					5.3843E-11	5.121E-11
RESISTIVIDAD	Ωm				53		

Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos se registraron resultados que superan los indicadores establecidos en otros trabajos para considerar un hormigón de una durabilidad adecuada (Baroghel-Bouny, 2004). Por tanto, con estos ensayos se certificó la fabricación de un hormigón de calidad baja desde el punto de vista de la durabilidad, objetivo marcado para la fabricación de las losas sobre las que se centra este trabajo. La alta capacidad de absorción del hormigón y la baja resistencia a los cloruros acelerarán los procesos de inicio de la corrosión en

este tipo de hormigón sin obligar a utilizar técnicas como la corriente impresa, las cuales pueden llevar a análisis de situaciones alejadas de un contexto real.

5.2. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO

Tal y como se describió en el apartado 4.2., el proceso de monitorización que se llevó a cabo sobre los sensores de las dos losas fabricadas se dividió en 3 etapas. Los resultados que se muestran a continuación también se han dividido en 3 partes, más un último apartado que sirve para ofrecer una visión global de todo el proceso de medida, el cual se extendió más de 200 días.

Antes de continuar se recuerda que cada losa tiene dos sensores. Los dos sensores en la losa 1, están ubicados de tal forma que el sensor 1 guarda un recubrimiento de 5cm y el sensor 2 un recubrimiento de 2.5 cm, mientras que los sensores de la losa 2 se encuentran localizados uno a una distancia de 7.5 cm y el otro a una distancia de 5cm de la cara superior de la losa, como se muestra en la imagen a continuación.

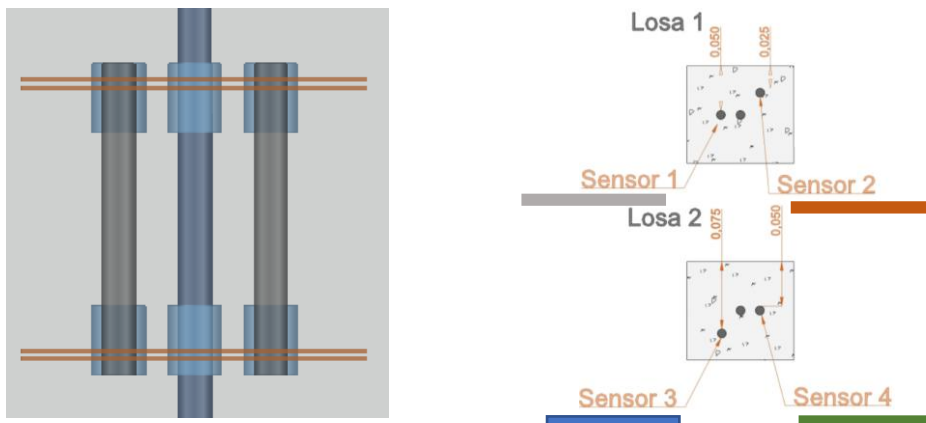


Imagen Nº 62. Planta y perfil de sensores en la losa.

Fuente: Elaboración propia.

La nomenclatura y color con el que se presentan los resultados de este apartado en los gráficos ha sido:

Tabla 11. Nomenclatura sensores

Recubrimiento de 5 cm	Losa1-Sensor1
Recubrimiento de 2.5 cm	Losa1-Sensor2
Recubrimiento de 7.5 cm	Losa2-Sensor3
Recubrimiento de 5 cm	Losa2-Sensor4

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Etapa 1

Al finalizar el periodo de curado y tras preparar y reparar el cableado, se realizó un seguimiento de la corrosión sobre los 4 sensores en estado pasivo. La configuración del armado se modificó diariamente: los sensores 1 y 3 de cada losa se mantuvieron aislados, mientras que los sensores 2 y 4 de cada losa fueron conectados para generar una macrocelda a distintos niveles del armado auxiliar. Durante esta etapa se midió el E_{CORR} e i_{CORR} de cada sensor mediante la técnica de pulsos PSV y la intensidad de macrocelda (únicamente en los sensores conectados). En la Imagen 63, 64, y 65 se presentan los resultados obtenidos para cada parámetro durante los 16 días que se extendió esta etapa.

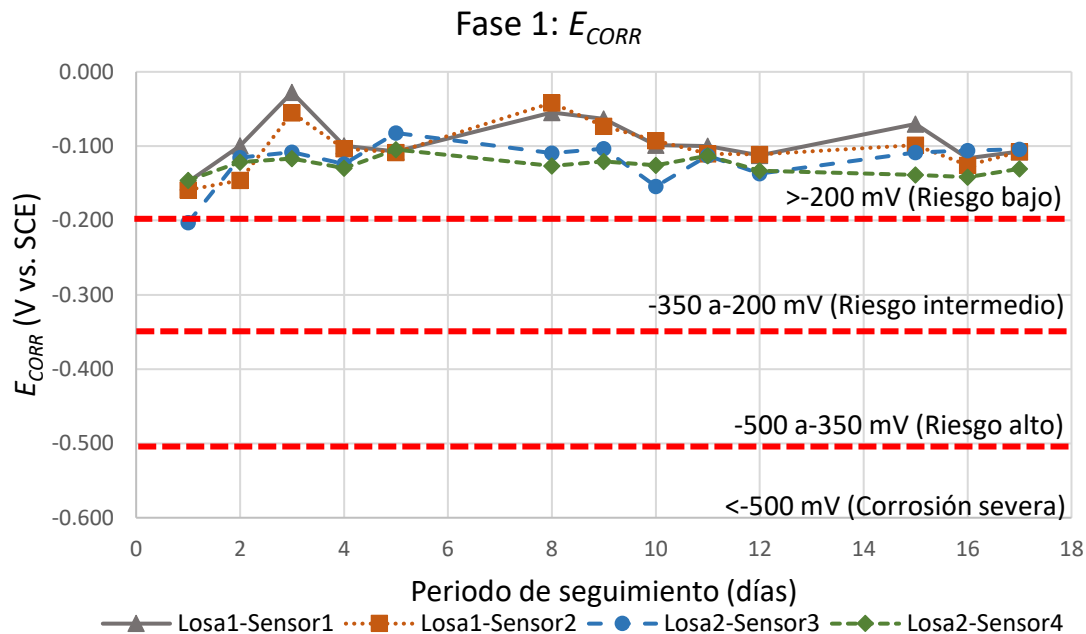


Imagen Nº 63. Potencial de corrosión E_{CORR} en le etapa 1

Fuente: Elaboración propia.

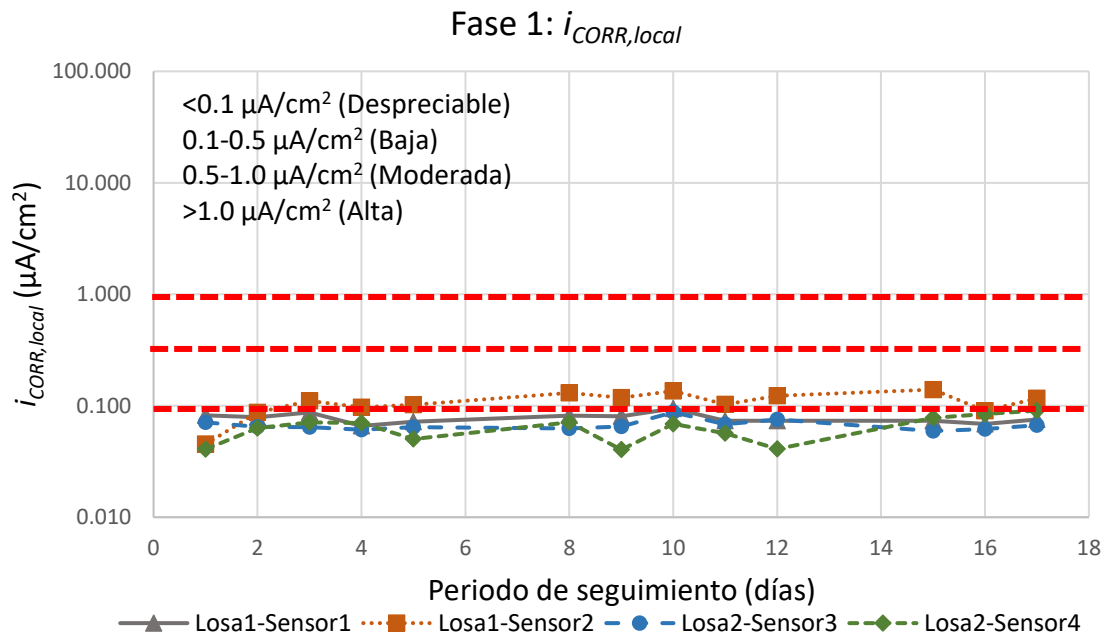


Imagen N° 64. intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ en la etapa 1

Fuente: Elaboración propia.

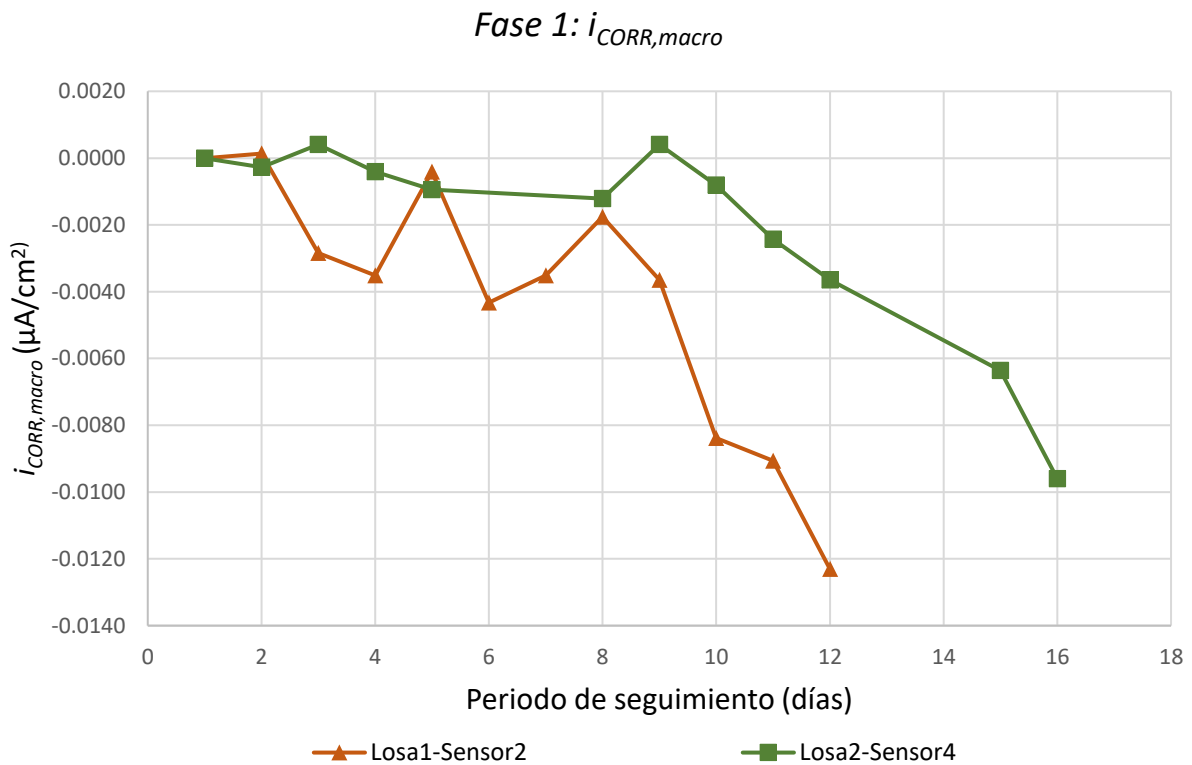


Imagen N° 65. intensidad de corrosión por macrocelda $i_{CORR,macro}$ en la etapa 1

Fuente: Elaboración propia.

Tanto en la Imagen 63 como en la Imagen 64 se han marcado los rangos establecidos por la norma UNE 112072:2011 sobre el riesgo de corrosión y las recomendaciones RILEM sobre los niveles de corrosión.

Tabla 12. Criterio de evaluación de la probabilidad de corrosión

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tasa de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Nivel de corrosión
< 0,1	< 1,16	Estado pasivo
0,1 a 0,5	1,16 a 5,80	Bajo a moderado estado de corrosión
0,5 a 1,0	5,80 a 11,60	Moderado a alto estado de corrosión
> 1,0	> 11,60	Alta tasa de corrosión

Fuente: (UNE, 2011)

De acuerdo con la tabla anterior, y para los potenciales de corrosión que se obtuvieron se pudo demostrar el riesgo de corrosión bajo. Los datos de la intensidad de corrosión presentan la misma tendencia, con valores por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (nivel de corrosión bajo). Únicamente el sensor 2 muestra valores entre 0.1 y $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que todavía se puede considerar un nivel de corrosión bajo. Este sensor era el que contaba con un menor recubrimiento, lo que influye en el entorno electroquímico del entorno modificando ligeramente su respuesta.

Los valores obtenidos de la intensidad de macrocelda reflejan una corriente de macrocelda nula para todas las configuraciones ($<0.015 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). La pasividad de los sensores no se ve afectada por este fenómeno. Al finalizar este periodo se procedió a la colocación del depósito para la exposición parcial al agente agresivo (cloruros) de las losas de hormigón armado.

5.2.2 Etapa 2

Una vez el depósito fue colocado y rellenado con disolución simulando el agua de mar (0.5 M NaCl), se realizó un seguimiento de la corrosión que se extendió 120 días. Durante este periodo no se generó ninguna macrocelda y los sensores permanecieron completamente aislados, y únicamente se analizó el potencial de corrosión y la intensidad de corrosión de cada sensor mediante la técnica de pulsos PSV. Los resultados obtenidos de este periodo se muestran en las Imágenes 66 y 67.

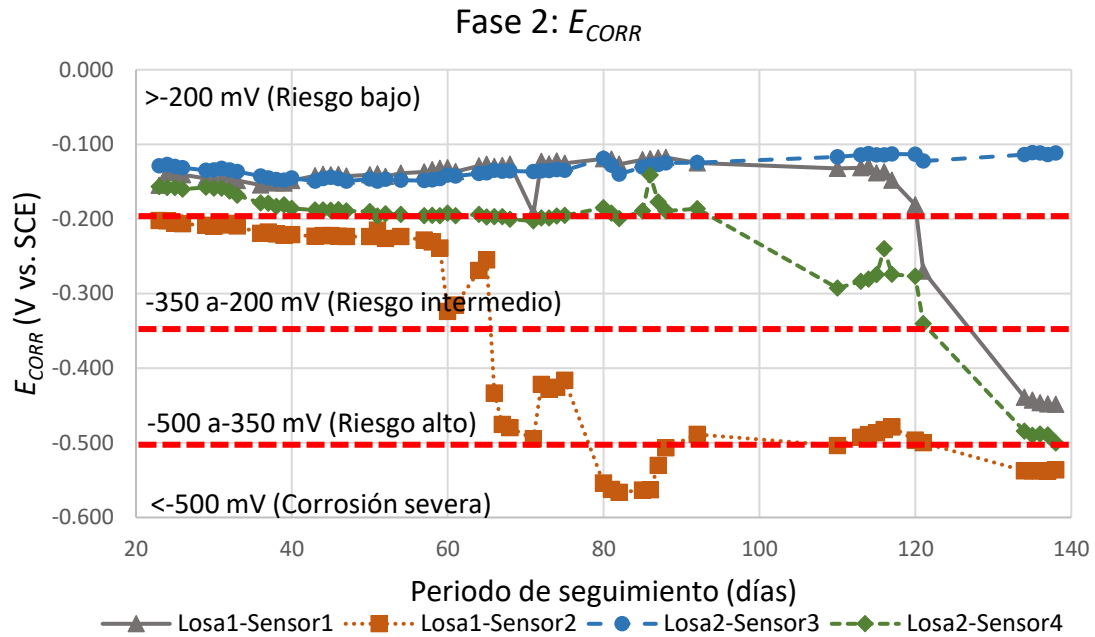


Imagen Nº 66. Potencial de corrosión E_{CORR} en le etapa 2

Fuente: Elaboración propia.

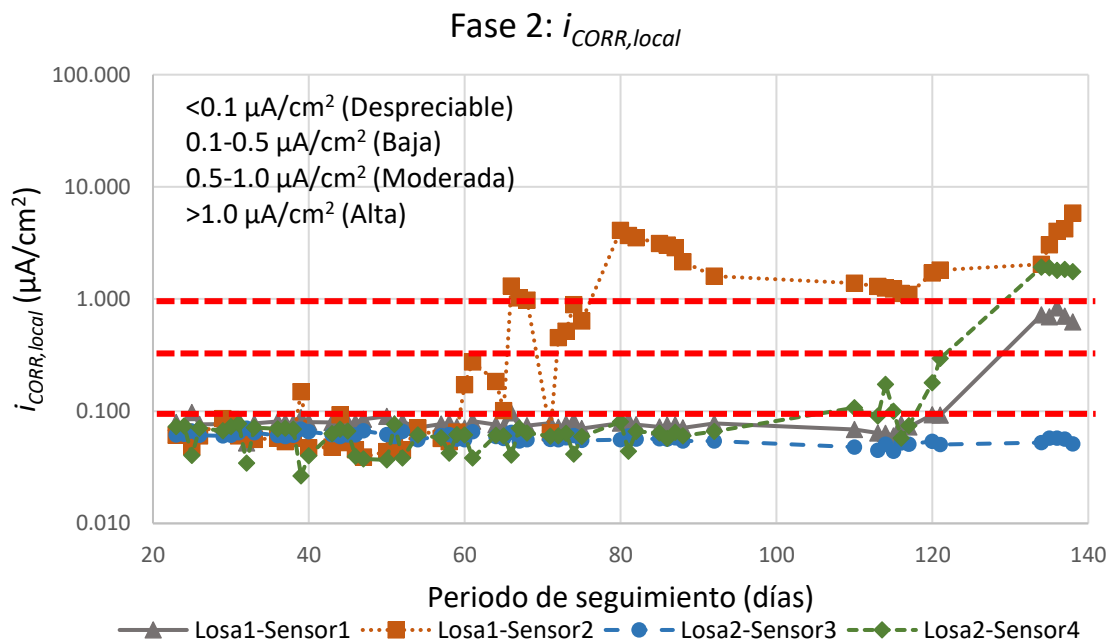


Imagen Nº 67. intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ en la etapa 2

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los 60 días se detectó un descenso progresivo del potencial de corrosión del sensor 2 de la losa 1 (hasta valores por debajo de -500 mV, lo que

coincide según las tablas de la norma UNE, con un riesgo alto de corrosión). Esta tendencia se repite en el seguimiento de la intensidad de corrosión (Imagen 67), donde a partir de esa fecha se pudo apreciar un aumento progresivo de la intensidad de corrosión hasta alcanzar valores por encima de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, niveles de corrosión alta. Estos datos demuestran como los cloruros alcanzaron en menos de 40 días este sensor. Se debe destacar que el recubrimiento del sensor 2 de la losa 1 era de 2.5 cm, el menor de todos los sensores analizados.

Los sensores 1 y 4 contaban con el doble de recubrimiento, 5 cm. Este mayor recubrimiento permitió a estos elementos mantener su pasividad por más tiempo. Sin embargo, al final de esta etapa, a partir de los 100-120 días se detectaron caídas del potencial de corrosión de ambos sensores (valores <-450 mV), acompañados de incrementos de la intensidad de corrosión con valores hasta valores en torno a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Estos datos indican la llegada de los cloruros a la profundidad de los sensores (5 cm).

El sensor 3 de la losa 2, mostró durante todo el periodo de seguimiento un riesgo de corrosión bajo y niveles de corrosión bajos ($<0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). El incremento del recubrimiento permitió incrementar la protección de la pieza y evitar que los cloruros alcanzasen este sensor.

Al finalizar este periodo se pudieron dividir los sensores en:

- un sensor despasivado y con nivel de corrosión alta;
- dos sensores despasivados con nivel de corrosión media-alta;
- y un sensor en estado pasivo.

5.2.3 Etapa 3

Una vez se establecieron los tres grupos de sensores-niveles de corrosión, se procedió con la tercera etapa. Durante este periodo se continuó con la monitorización de la corrosión, pero se generaron distintas configuraciones de macrocelda a lo largo del proceso para apreciar la evolución del fenómeno.

Como se definió en el capítulo 4 y se resume en la Imagen 68, semanalmente se creó una macrocelda con distintas ratios cátodo/ánodo. Diariamente se midió la intensidad de corrosión local (método PSV) y la intensidad de macrocelda (amperímetro). En las Imágenes 69, 70 y 71 se muestra la evolución durante esta etapa de los tres parámetros (potencial de corrosión, intensidad de corrosión local y la intensidad de la macrocelda en cada caso).

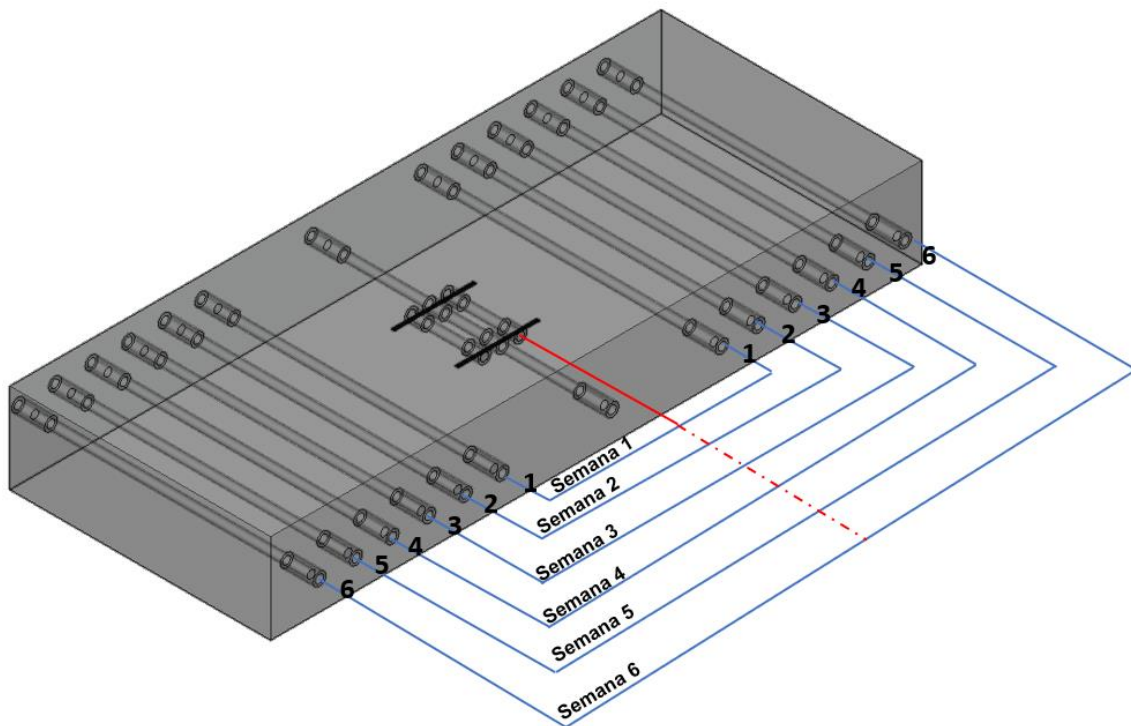


Imagen Nº 68. Conexiones semanales de macrocelda

Fuente: Elaboración propia.

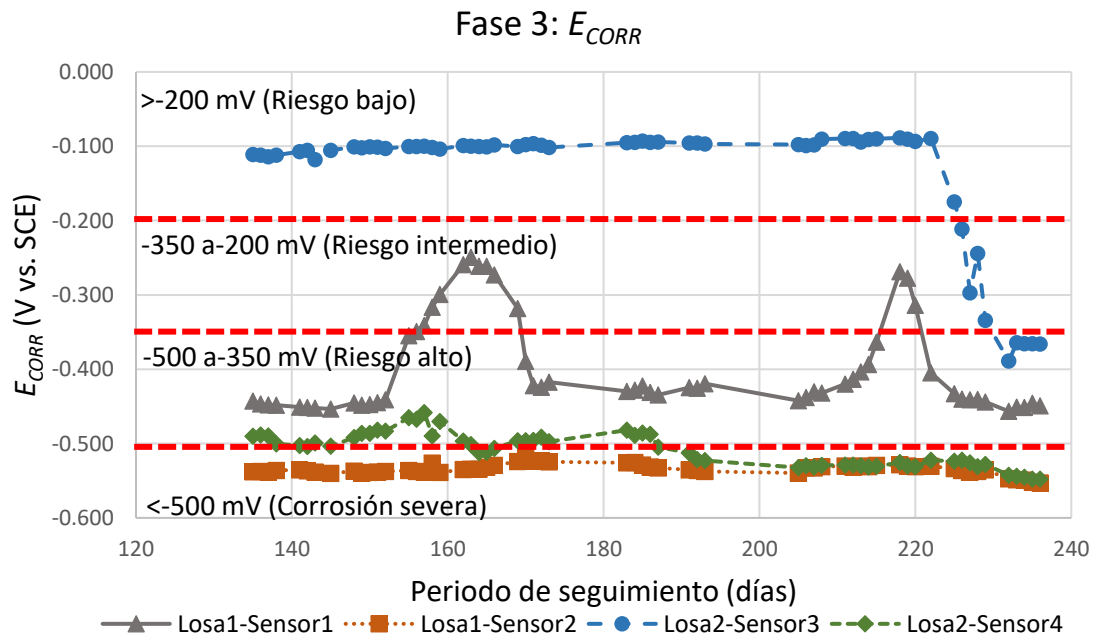
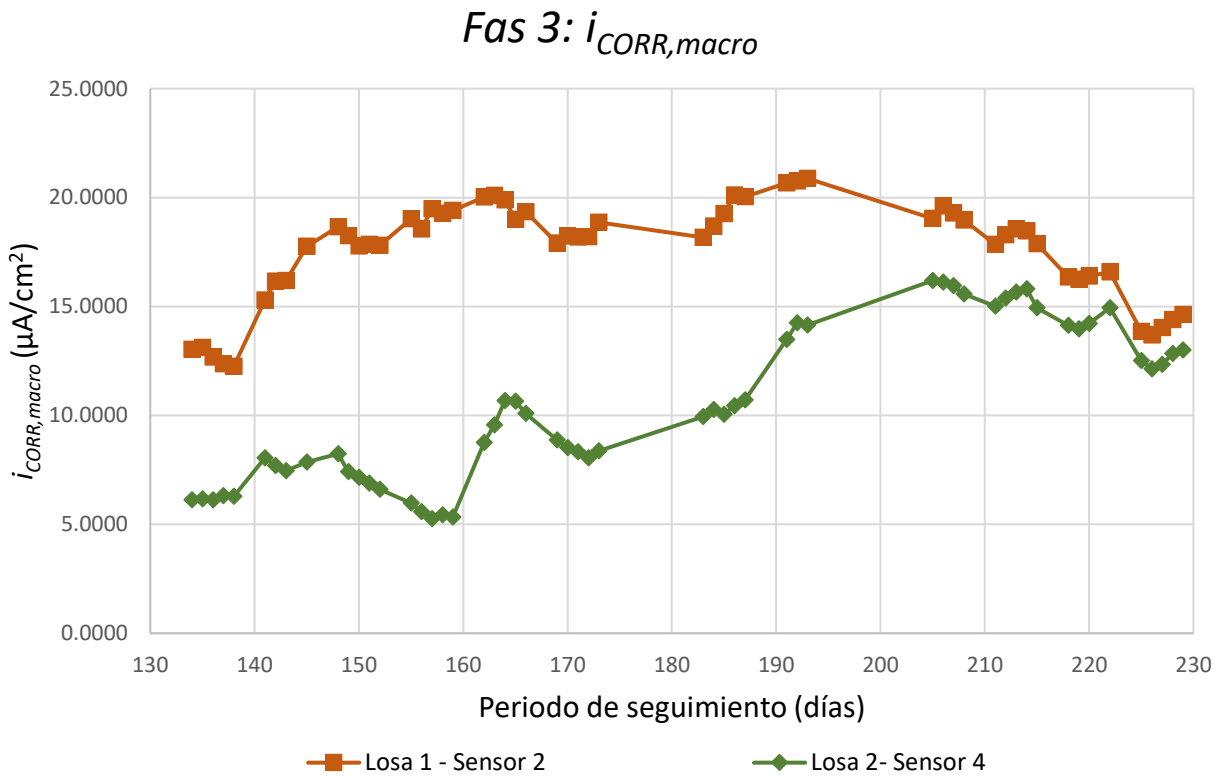
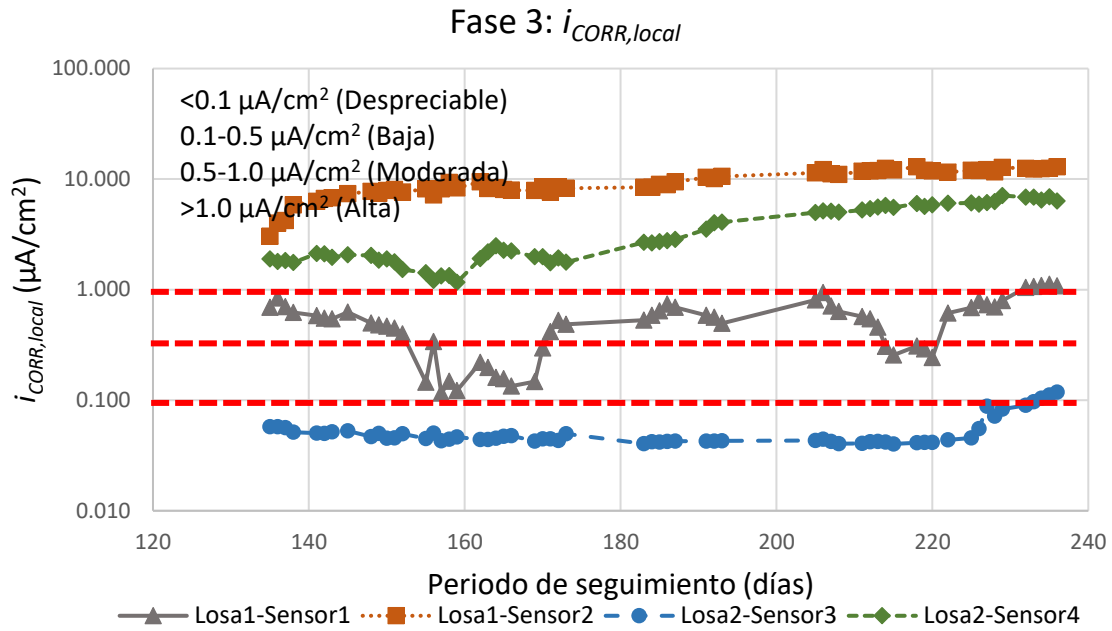


Imagen Nº 69. Potencial de corrosión E_{CORR} en la etapa 3

Fuente: Elaboración propia.



Respecto al potencial de corrosión se puede comprobar como los resultados muestran la misma tendencia vista en las etapas anteriores. El sensor 3 (azul), con un recubrimiento más alto mostró al inicio de este periodo un riesgo de corrosión bajo (<-200 mV) gracias a su estado de pasividad otorgado por un mayor recubrimiento. A partir de los 220 días se pudo apreciar un cambio de tendencia por la posible llegada de los cloruros.

Sin embargo, los sensores 1, 2 y 4 mostraron un riesgo de corrosión más alto al estar en estado activo. Los sensores 2 y 4 no mostraron ninguna variación por las distintas configuraciones de macrocelda empleadas, en cambio, el sensor 1 mostró un comportamiento más errático.

Estos saltos en el potencial de corrosión también se pudieron apreciar en el seguimiento de la intensidad de corrosión. Sin embargo, el rasgo que se debe destacar es la ligera variación entre el inicio de esta etapa y el final ($<10\%$). Al tratarse de un sensor en estado aislado (sin macrocelda) el entorno físicoquímico no varió y la intensidad de corrosión apenas sufrió cambios. Idéntica tendencia se detectó en el sensor 3, inicialmente en estado pasivo. Únicamente al final del periodo se detectó un incremento en la densidad de corrosión por la posible llegada de los cloruros.

En cambio, el comportamiento de los sensores 2 y 4, afectados por corrientes de macrocelda de diferente magnitud sí que incidieron en la evolución de la corriente de corrosión local. Ambos sensores presentaron incrementos de la densidad de corrosión entre 300% y 400% , alcanzando valores por encima de $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, muy superiores a los que se pueden encontrar normalmente en estructuras de hormigón armado (el sensor 2 inició la etapa en $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y alcanzó los $13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, mientras que el sensor 4 pasó de 2 a $6.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Estos datos ya hacen indicar la importancia de las macroceldas en la medida de la corrosión.

Si se analiza únicamente dicho parámetro, en la Imagen 72 se presenta el valor promedio de la intensidad de macrocelda para cada semana tanto para el sensor 2 como el sensor 4.

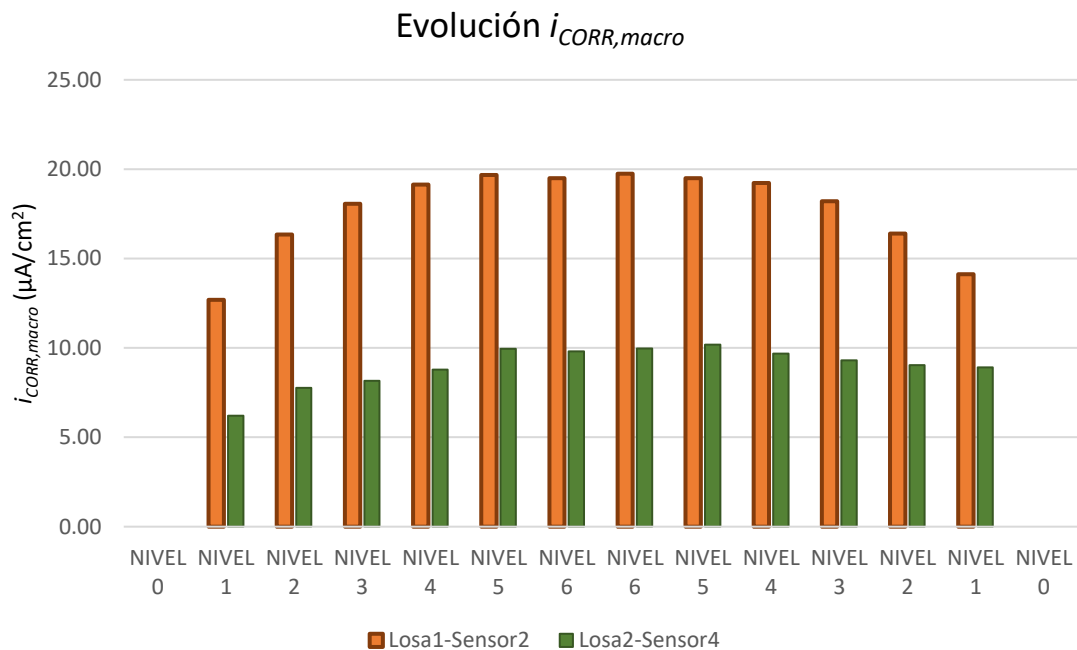


Imagen Nº 72. Evolución de $i_{CORR,macro}$ por semana

Fuente: Elaboración propia.

En ambos sensores se pudo apreciar una tendencia ascendente asociada al aumento de la ratio cátodo/ánodo hasta el nivel 4-5. En este caso, tanto por la distancia de las armaduras añadidas en los niveles 5-6 y la limitación a ceder electrones opuesta por los sensores, el valor de la $i_{CORR,macro}$ se mantuvo constante. Durante la etapa en la que se fueron desconectando niveles progresivamente se pudo apreciar de nuevo la tendencia descrita, pero en el sentido inverso. El descenso en la ratio cátodo/ánodo conduce a una menor demanda de electrones en el ánodo y, por tanto, una menor corriente de macrocelda.

Sin embargo, tal y como se describió en el estado del arte, el nivel de corrosión real de un elemento embebido en hormigón corresponde a la suma de ambas corrientes, la corrosión local y la corrosión total. En el siguiente apartado se presenta este parámetro (corrosión total), con una visión global de la evolución durante todo el experimental.

5.2.4 Visión global del periodo de seguimiento: discusión

En las Imágenes 73 y 74 se muestran los valores de la intensidad de corrosión local y total.

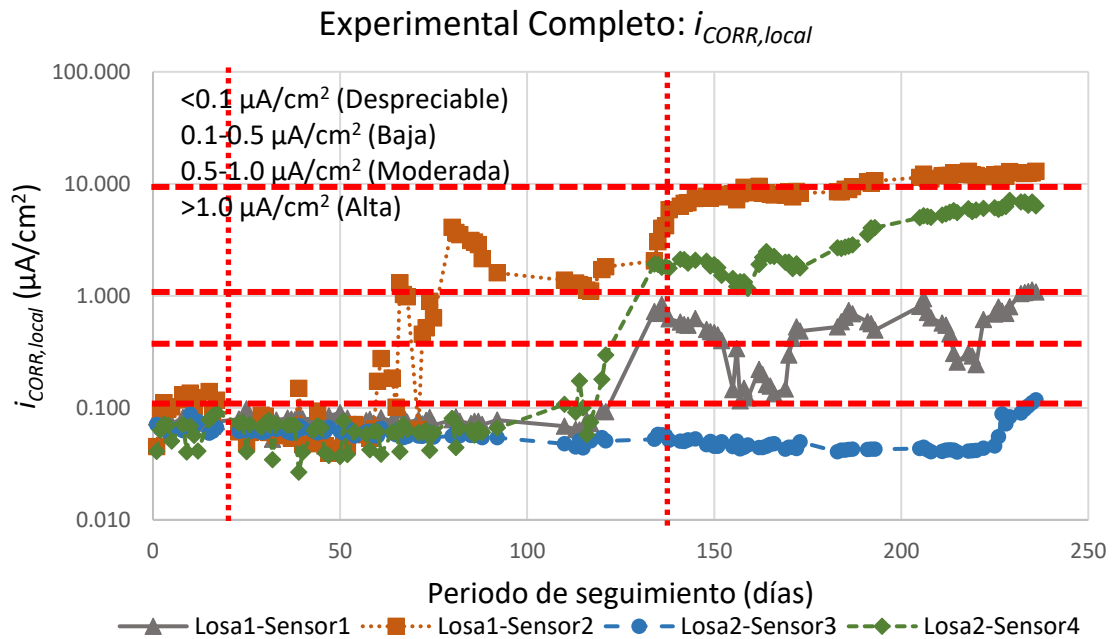


Imagen Nº 73. Intensidad de corrosión local $i_{CORR,local}$ completo.

Fuente: Elaboración propia.

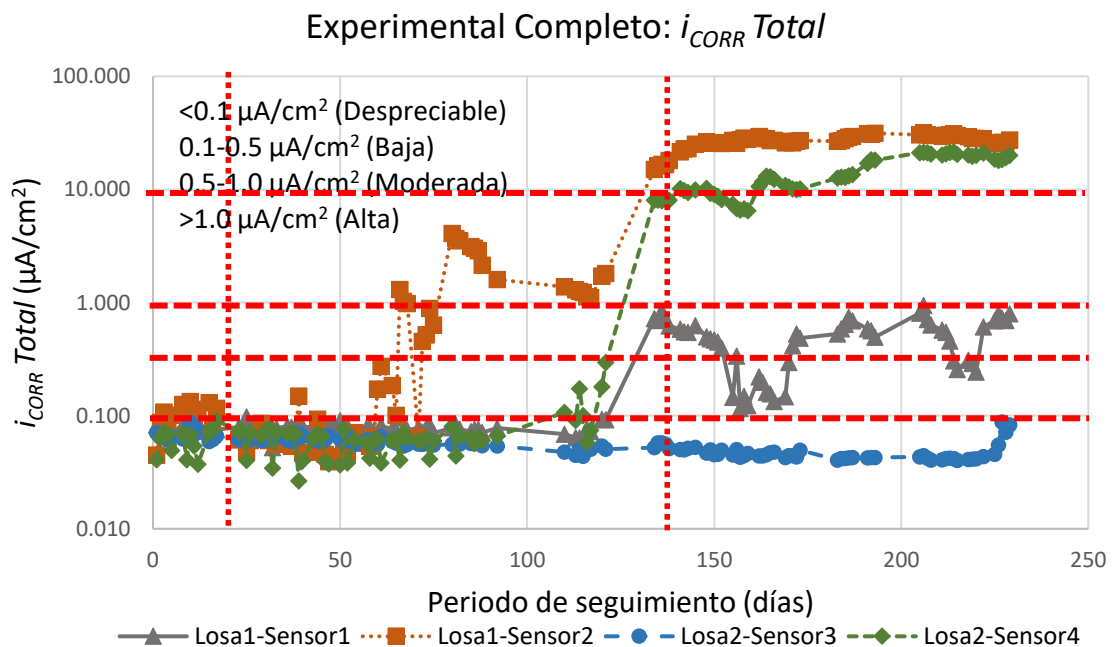


Imagen Nº 74. Intensidad de corrosión i_{CORR} .

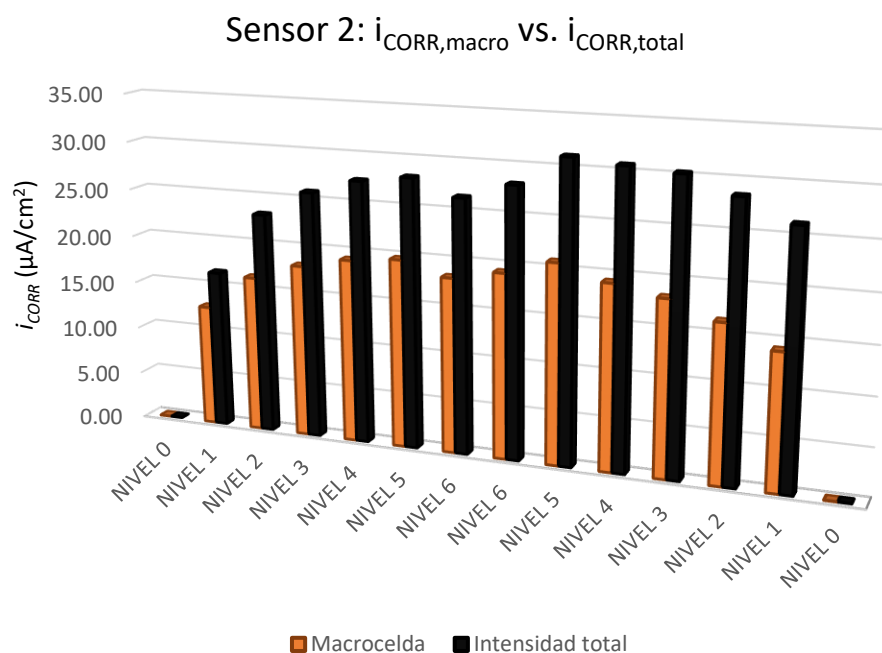
Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 73 se puede apreciar el distinto comportamiento de los sensores en las tres etapas establecidas y en lo referente a la intensidad de

corrosión local (causada por el entorno fisicoquímico del sensor). La primera etapa corresponde al periodo de estado pasivo, la segunda la transición a niveles de corrosión alta (sensores 1, 2, y 4) y la tercera la influencia de los procesos de macrocelda. En el apartado anterior ya se destacó el aumento que implicaron los procesos de macrocelda en la corrosión de los sensores 2 y 4, mientras que el sensor 3, en estado ya despasivado no varió su corrosión (<10%).

Por otro lado, si en esta tercera etapa se compara el valor de la intensidad de corrosión local y total se puede apreciar el cambio que presentan los sensores 2 y 4. Considerando únicamente la corrosión local, durante la última etapa el valor promedio de la corrosión al final del periodo fue de $12.00 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el sensor 2 y de $6.30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el sensor 4. Sin embargo, teniendo en cuenta el valor de la corrosión total, los valores alcanzados fueron de 27.40 y $20.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente, un 200% y 350% más.

En la Imagen 75 se representan el valor tanto del sensor 2 como del 4 de los valores de la corrosión por macrocelda y corrosión total. En estas imágenes se puede apreciar el peso de la macrocelda en el estado de una armadura embebida en hormigón.



Sensor 4: $i_{CORR,macro}$ vs. $i_{CORR,total}$

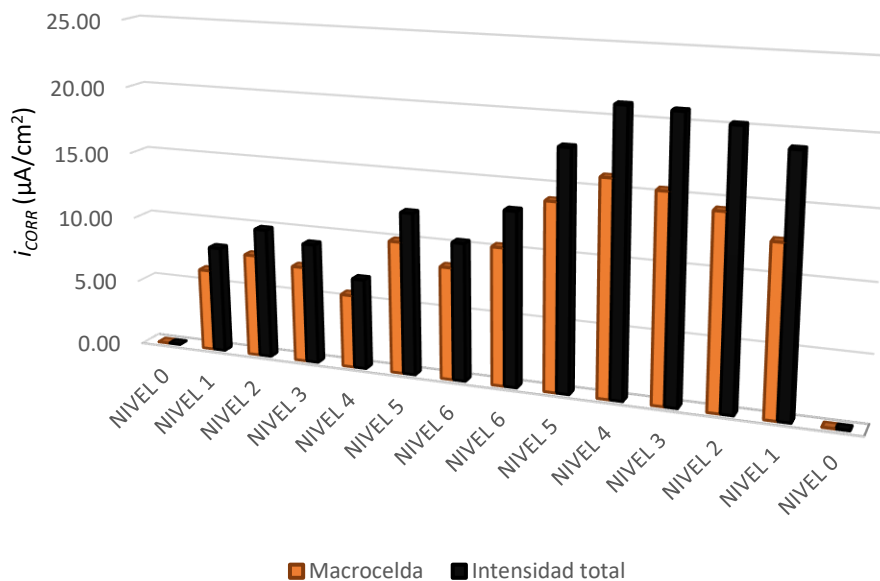


Imagen Nº 75. Valores de la corrosión por macrocelda y corrosión total

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje que supone la corriente de macorcelda en el total de la corrosión se calculó numéricamente y se presenta en la Imagen 76.

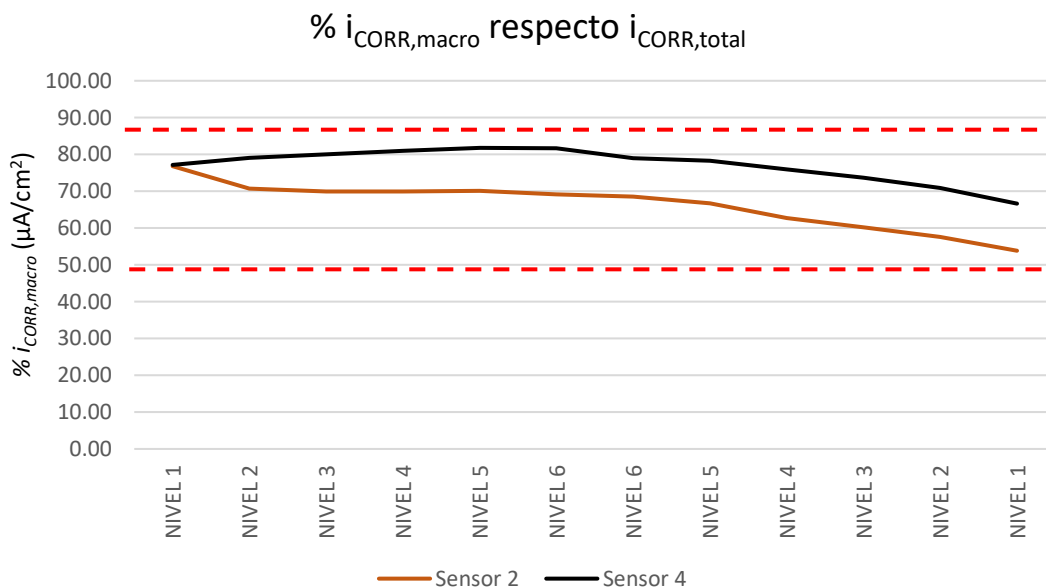


Imagen Nº 76. Porcentaje de la corriente de macorcelda sobre la corrosión total

Fuente: Elaboración propia.



Los resultados obtenidos demuestran que la macrocelda supone entre un 55 y 85 % de la corrosión total para el caso de estudio que se describe en este trabajo. La no consideración de este fenómeno supone una minoración del daño real. Este error puede llevar a la interpretación errónea del estado de una estructura y las posteriores predicciones de vida útil que se realicen.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

A raíz de los resultados obtenidos del seguimiento de los procesos de corrosión de las dos losas de hormigón armado fabricadas para este trabajo se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

-en el caso de armaduras que mantienen la pasividad inicial (etapa 1) se pudo comprobar que las corrientes de macrocelda parecen no influir en la cinética del proceso

-en el caso de armaduras despasivadas donde ya existen procesos de corrosión activos, las corrientes de macrocelda incrementan significativamente las densidades de corrosión local. En este caso de estudio el incremento apreciado fue entre el 300% y 400%.

-la corriente de corrosión total corresponde a la suma de la corrosión local y la corrosión por macrocelda. Del total de corrosión que afecta a una armadura, y para el caso de estudio tratado en este trabajo, la macrocelda supone entre un 55% y 85% de la corrosión total. La no consideración de este fenómeno puede implicar errores de valoración del daño y de estimación de la vida útil de una estructura.

Por tanto, y a partir de las conclusiones anteriores se considera que es necesario que el elemento que se emplee como sensor esté conectado a la estructura como se propone en el sistema INESSCOM y con la finalidad de alcanzar resultados más fiables y precisos se incluya el registro de la $i_{CORR,macro}$. En la Imagen 77 se esquemáticamente esta idea, con base al sistema original detallado en el apartado 32.

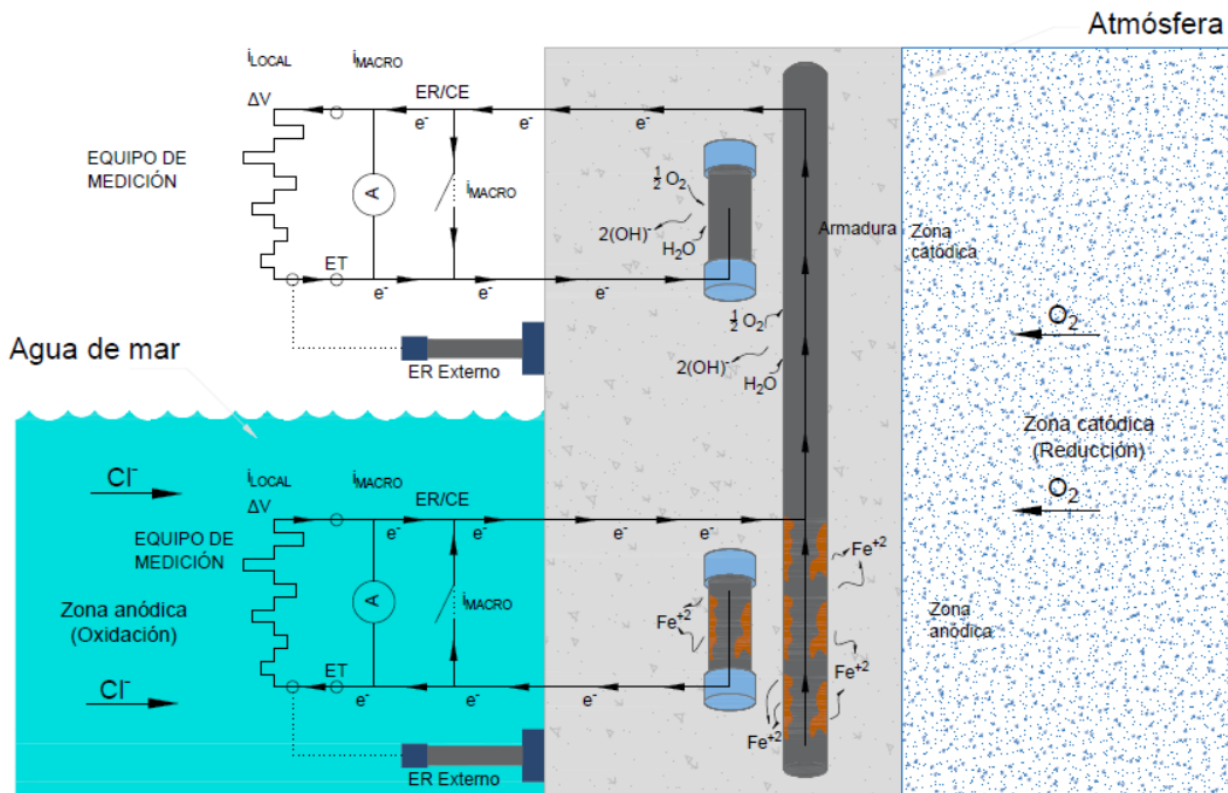


Imagen Nº 77. Propuesta modelo de mejora sistema INESSCOM

Fuente: Elaboración propia.

El sensor mantiene un estado de “conectado” en todo momento cuando no se realizan medidas para participar de los procesos de macrocelda que se desarrollan en su entorno. Cuando se desee realizar la medida el sensor pasará a la posición 2, en la que se analizará mediante un amperímetro la corriente de macrocelda existente ($i_{CORR,macro}$). Una vez finalizada la medida, el sensor pasará a la posición 3, donde se aplicará el procedimiento de medida para obtener la intensidad de corrosión local ($i_{CORR,local}$) (método PSV).

El procesado de estas señales ($i_{CORR,macro} + i_{CORR,local}$) permitirá conocer la corrosión total (i_{CORR}) de manera más precisa que el sistema actual, y de esta forma, conseguir generar un sistema de monitorización con mayor fiabilidad a la hora de analizar la corrosión en estructuras de hormigón armado.

El desarrollo técnico y electroquímico de la propuesta para implementación en la red de sensores existente corresponde a la Tesis Doctoral del codirector de este trabajo, Josep Ramon Lliso Ferrando, y se encuentra todavía en fase de validación. El trabajo presentado en esta tesis ayudará en el aspecto experimental a sentar las bases para validar el método.

CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El caso experimental que se ha desarrollado en este trabajo ha dejado abierta una cuestión que se pretende resolver en futuras investigaciones.

En la descripción de la evolución de las corrientes de macrocelda en la etapa 3 se presentó la variación que se produce en función de la ratio de superficies cátodo/ánodo existente. Sin embargo, en este sistema también entran en juego factores como la resistencia eléctrica del hormigón o la distancia entre los elementos. Debido a esto se propone desarrollar un trabajo experimental paralelo al realizado en este trabajo, pero basado en modelos numéricos y virtuales.

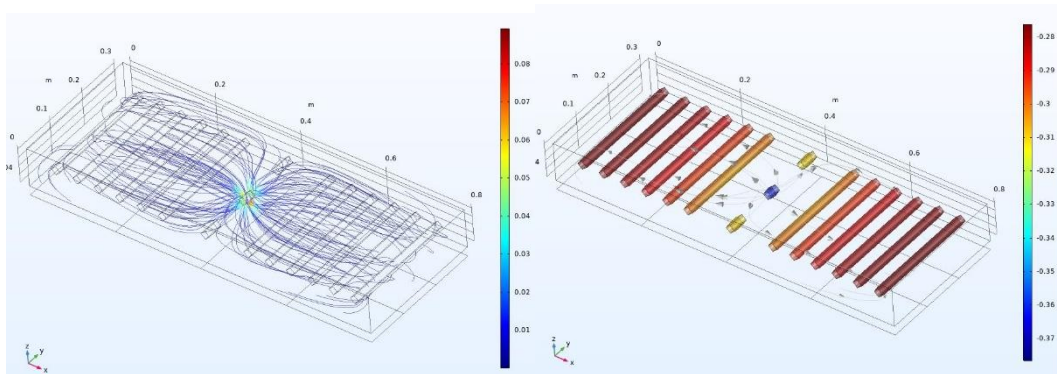


Imagen Nº 78. Modelado de las macroceldas en las losas realizados con herramientas informáticas.

Fuente: Josep Ramon Lliso Ferrando.

En la Imagen 78 se muestran los primeros avances desarrollados por los directores de este trabajo con el software ComsolMultiphysics. Tanto los resultados presentados en esta tesis como los obtenidos en estas nuevas investigaciones permitirán comprender mejor el comportamiento real de las armaduras embebidas en hormigón.



CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- Aeronautics Guide*. (Febrero de 2020). Obtenido de <https://www.aircraftsystemstech.com/2019/04/forms-of-corrosion-aircraft-corrosion.html>
- Acuña, G. (2019). Fundamentos de cinética electroquímica. Parte I. *Universidad de Chile Beauchef*, 33.
- Aguilar Schafer, J. (2017). *Corrosion y Oxidacion*. Obtenido de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cml/6-Oxidacion.pdf>
- Alario, E. (Enero de 2021). *Alario Arquitectura Tecnica*. Obtenido de Alario Arquitectura Tecnica: <https://enriquealario.com/>
- Amador, A. (2017). *ERCH2014*. Obtenido de ERCH2014: <https://es.erch2014.com/>
- Amaya, J., Cornejo, M., & Rigail-Cedeno, A. (2018). Análisis del costo del ciclo de vida del uso de inhibidores de corrosión para la protección de estructuras de hormigón armado. *ESPOL*, 28.
- AMPP (Ed.). (04 de 05 de 2021). *AMPP Association for Materials Protection and Performance*. Obtenido de <https://ampp.org/home>
- Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37.
- Andrade, C., Garcéa, P., & Martínez, I. (s.f.). S.
- Andrade, C., Garces, P., & Martinez, I. (2008). *Coorrosion*. 2959.
- ANEFHOP. (1 de Mayo de 2021). *Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado*. Obtenido de ANEFHOP: <https://www.anefhop.com/>
- Ann, Y.-K., & Ryou, J. (2009). The importance of chloride content of the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structure. *Construction and Building Materials*, 23.
- ASTM C-876. (2015). *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Pensilvania: ASTM.
- ASTM C876-91. (2005). *Método Estándar de Ensayo para potenciales de media celda para acero de refuerzo no revestido en concreto*. N.Y.
- Baroghel-Bouny, V. (2004). *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages—Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction*. Bagneux: the French Civil Engineering Association, AFGC.
- BECOSAN. (enero de 2021). *Becosan concrete floors*. Obtenido de <https://www.becosan.com/es/hormigon-postensado/>

- Bermudez , M. (2007). *Corrosion de las armaduras del hormigón en ambiente marino: Zona de carrera de mareas y zona sumergida*. Madrid: UPM.
- Bilurbina Alter, L., Liesa, F., & Iribarren Laco, j. I. (2003). *Corrosión y protección*. Barcelona, España: UPC.
- Boden, P. J. (1994). *Effect of Concentration, velocity and temperature*.
- Brown. (1992). *Durability of Building Materials*.
- Bukorovic , M. (Junio de 2019). *Arquitectura Book*. Obtenido de Arquitectura Book: www.BukorovicBookPhoto.com
- Carnevali, C. (2018). Procedimiento para la determinación de la Resistencia de Polarización Lineal. *INCALIN*, 45.
- Carvajal, A. (2004). Medidas de potencial de corrosión en sistemas de penetración acelerada de iones Cl en hormigón armado. *Revista de la construcción*, 40.
- Caselles Pomares, M. J. (2015). *Química aplicada a la ingeniería*. Madrid, España: UNED.
- Castañeda, A., & Rodríguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *CENIC. Ciencias Químicas*, 45.
- Castorena González J.H, A. C. (2011). Análisis con elemento finito de los esfuerzos expansivos por corrosión en las estructuras de concreto reforzado. *Ingeniería, investigación y tecnología, versión impresa ISSN 1405-7743*, 45.
- Cedrón, j. (septiembre de 2011). <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html>. Recuperado el Febrero de 2021, de Química general: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html>
- Cesáreo Gomez, F., & Alcaraz Lorente, D. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Murcia, España: UM.
- Chinè-Polito, B., Cuevas-Kauffmann, R., Jimenez salas, R., & Ortiz Quesada, G. (junio de 2019). Estudio experimental de la carbonatación del concreto. *Tecnología en marcha*, 32, 68.
- Climent , M., Miro, M., Carbajo, J., & Poveda, P. (2019). Use of Non-Linear Ultrasonic Techniques to Detect Cracks Due to Steel Corrosion in Reinforced Concrete Structures. *MDPI*.
- Colegio de ingenieros industriales*. (11 de Febrero de 2021). Obtenido de IICV: <https://iicv.net/>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. (1991). *Corrosión y Protección Metalicas*. Madrid, España: CSIC.
- Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S., & Neri-Flores, M. (2011). Electrochemical corrosion and electrical resistivity of reinforced recycled aggregate concrete. *Int. J. Electrochem. Sci*, 6.

- Corte, D., & Peña, J. (2010). Obtencion de curvas galvanostaticas y ensayos de resistencia a la polarizacion en varillas de construccion ASTM A42 en solucion de agua al 3.5% de cloruro de sodio. *Tecnologia ESPOL*, 10.
- COTECNO. (Mayo de 2021). *Normas NCH*. Obtenido de Corrosión Del Refuerzo De Acero En Hormigón: Causas Y Protección: <https://www.cotecno.cl/>
- Del Valle Moreno, A. (2001). *El fenomeno de la corrosion en estructuras de concreto reforzado*. Mexico D.F: SCT.
- Dinamarca, P. (2013). Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide, *Corrosion Science*,. *UAC*, 30.
- Duffó, G., & Farina, S. (2012). Corrosion en estructuras de hormigon armado. *3iA Universidad Nacional San Martin*, 51.
- Escobedo , P. (2018). Tecnicas electromiquicas de corriente directa para la determinacion de la velocidad de corrosion. *CIDETEQ*, 45.
- Fajardo Panizo, S. (2013). *Comportamiento frente a la corrosión de un nuevo acero inoxidable con bajo contenido en níquel en soluciones alcalinas basadas en hidróxido de calcio*. Madrid, España: UCM.
- Fajardo, S. (2013). *comportamiento frente a la corrosión de un nuevo acero inoxidable con bajo contenido en níquel en soluciones alcalinas basadas en hidróxido de calcio*. Madrid: UCM.
- Felix, E., & Rodriguez, T. (2018). Análisis da vida útil de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión uniforme por medio de un modelo con RNA acoplado al MEF. *Alconpat*.
- Fernández Domene, R. M., Sánchez Tovar, R., Lucas Granados, B., & García Anton, J. (2018). *Crrosión*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Fernandez Garcia, S. (2016). *Corrosion de armaduras en el hormigón armado en ambiente marino aéreo*. Madrid: UPM.
- Fernandez, P. (2018). *Determinación de corrientes de macropar en estructuras de hormigon armado*. Valencia: UPV.
- Garces, P., & Martínez, I. (2008). *Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide*, *Corrosion Science* (Vol. 50).
- Genesca, J. (2017). Tecnicas electroquimicas de corriente directa para la determinacion de la velocidad de corrosion. *UNAM*, 10.
- Gillespie Humphreus , B. R. (1990). *Química*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Gómez Botero, M. (2005). *Caracterizacion de las propiedades tribologicas de los recubrimientos duros*. Barcelona, España: UB.

- González Fernández, J. A., & Miranda, V. J. (2007). *Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamentos, medida, diagnóstico y prevención*. Madrid, España: Concejo superior de investigaciones científicas.
- González Luque, R. (2011). *Química general para las ciencias ambientales*. Valencia, España: PUV universidad de Valencia.
- Gonzalez Muradás, R. M., & Montagut Bosque, P. (2015). *Química*. Mexico, Mexico: Patria S.A.
- Gonzalez, J. (1984). *Teoría y practica de la lucha contra la corrosion*. Madrid: C.S.I.C.
- Hirsch, T. (2018). *Hacia la implementación ambiciosa del Acuerdo de París*. Ginebra: ACTAlianza.
- Instituto eduardo torroja de ciencias de la construccion . (1989). *Manual de inspeccion de obras dañadas por corrosion de armaduras* . Madrid: CSIC.
- Irvine, J. (2020). The Butler-Volmer Model. En T. Over. USA.
- Kanematsu, H., & Barry, D. (2016). *Corrosion control and surface finishing* . Tokio: springer.
- Igp, C. (11 de Julio de 2006). *Ingenieria Mecanica col*. Obtenido de <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/>
- Licausi, M. P. (2017). *Analysis of tribocorrosion behavior of biomedical powder metallurgy titanium alloys*. Valencia, España: UPV Universidad de valencia.
- Martinez, A. (2016). *Modelizacion de procesos de macropar galvánico en estructuras de hormigón armado*. Valencia: UPV.
- Martinez, C., Andrade, A., Alonso, C., & Fullea, J. (2001). Nuevas técnicas avanzadas para la medida in situ de la corrosión en hormigón armado. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)*, 29.
- Martinez, L., Castillo, A., & Andrade, C. (octubre de 2012). Evaluación de la corrosión en estructuras de contención nuclear mediante el uso de técnicas electroquímicas no destructivas. *Informes de la construcción*, 64.
- masmar tecnologia naval*. (27 de Enero de 2015). Obtenido de <http://www.masmar.net/index.php/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Tecnolog%C3%ADa-Naval/Acci%C3%B3n-Galv%C3%A1nica.-Cosas-b%C3%A1sicas-respecto-a-la-corrosi%C3%B3n>
- McArthur, T. (2009). Combating Corrosion. *Civil Engineering Magazine*, 79.
- McCarthy, N. (2019). China Produces More Cement Than The Rest Of The World Combined. *Forbes*.
- MEAS, Y. (2015). *técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión*. . Mexico D.F.
- Mille, S., Horvath, A., & Monteiro , P. (08 de Enero de 2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 69.

- Ministerio de fomento. (2011). *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural*. Madrid: Serie Normativas.
- Mizrahi, R. (1994). *Mecanismo de disolución selectiva de aleaciones cadmio-magnesio*. (UBA, Ed.) Buenos Aires, Argentina.
- Monzón, P. (2019). *Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico*. Valencia: UPV.
- Moreno Romero, J. D. (2016). *Efecto del ambiente marino en edificios de segunda residencia en la costa valenciana*. (UPV, Ed.) Valencia, España.
- Nasser, A., Clément, A., Laurens, S., & Castel, A. (2009). Influence of steel–concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete. *Elsevier*, 52.
- NT BUILD 492. (2008). *NT BUILD 492 Determinación de la migración de cloruros*. Noruega: NT BUILD.
- O'Reilly Díaz, V., Bancroft, R., & Ruiz, L. (02 de Junio de 2010). LAS TECNOLOGÍAS DEL CONCRETO EN SU CICLO DE VIDA. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.*
- Ortega, F. (2018). *Optimization of warranties based on the wear of buried metallic structures*. Oviedo: ediuno.
- Pancorbo, F. J. (2011). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Barcelona, España: Marcombo S.A.
- Pazos Peinado, N. (2006). *Tecnología de los metales y procesos de manufactura*. Caracas, Venezuela: Universidad Católica.
- Pérez Díaz, J. (2008). *Evaluación de macroceldas de corrosión en vigas de concreto reforzado bajo ambiente salino*. Chihuahua: CIMAR.
- Pérez Méndez, L. R. (2010). *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión*. (UPM, Ed.) Madrid, España.
- Quiceno, E. (2017). *Caracterización electroquímica de una función gris*. Pereira: UTP.
- Rajendran, S., Nguyen, T., Kakooei, S., Yeganeh, M., & Li, Y. (2020). *Corrosion protection at the nanoscale*. Amsterdam, Holanda: Elsevier.
- Ramírez Cruz, E. (1994). *Corrosión de las armaduras embebidas en hormigón en ambientes de extrema agresividad. Posibilidades de protección mediante inhibidores*. Madrid: UCM.
- Ramon, J. E. (2018). *Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*. Valencia: UPV.
- Ramón, J. E. (2018). *Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*. Valencia: UPV.
- Rivas, J. (1977). *Superficies de hormigón visto*. Barcelona: Editores técnicos asociados S.A.

- Rivera-Corral, J., & Fajardo San Miguel, G. (2018). *Comportamiento a la corrosión de las barras de refuerzo de acero empotradas en hormigón expuestas a cloruros: Efecto del acabado superficial*. Mexico: UPL.
- Rodríguez Gómez, F. J. (2014). Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión. *UNAM*, 25.
- Rodríguez, F. (2008). Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión. *UNAM*, 18.
- San Juan Barbudo, M. Á. (2002). *Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la*. Madrid, Español: UCM.
- Sanchez, A. (2018). *Setting up an equipment for measuring corrosion rates and performing experiments*. Zaragoza: UZ.
- Seguí, P. (Enero de 2019). El hormigón: el material más destructivo de la Tierra. *OVACEN*.
- Sepúlveda, R. (2017). *Patología estructural - estructuras de hormigón*. Valencia.
- Sohail, M. G., Laurens, S., Deby, F., & Balayssac, J. P. (2015). Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation. *Materials and Structures*, 48.
- Traversa, L., Villagran, Y., & Di Maio, A. (2007). Métodos de evaluación y diagnóstico de la vida útil remanente de estructuras de hormigón armado en ambiente marino. *Comisión de investigaciones científicas BA*, 33.
- Tutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Suecia: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Lund: Lund University.
- UNE. (2008). *UNE-EN 83966. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad*. Madrid: UNE.
- UNE. (2008). *UNE-EN 83982 Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido*. Madrid: UNE.
- UNE. (2009). *UNE-EN 12390-3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. Madrid: UNE.
- UNE. (2011). *UNE 112072: Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*. Madrid: UNE.
- UNE. (2014). *UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*. Madrid: UNE.
- UNE. (2014). *UNE-EN 83980 determinación de la adsorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón*. Madrid: UNE.
- UNE. (2020). *Norma Europea EN ISO 8044:2020*. Genova: UNE.
- UPCT Escuela de Ingeniería técnica civil. (2007). *Historia del hormigón*. Cartagena: UPCT.



Vásquez, M. (2018). *La corrosión*. Mar de Plata, Argentina: EUEM.

W.F. Gale, T. T. (2004). *Smithells Metals Reference Book*. Auburn, Estados Unidos: Elsevier Ltd.

Watts, J. (25 de Febrero de 2019). Concrete: the most destructive material on earth. *The guardian*.

Zaki, A. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Londres: Elsevier Science & Technology.

