

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Análisis de las corrientes de macrocela en estructuras de hormigón armado.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EDIFICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR

MIGUEL ÁNGEL BLANCO DUARTE

TUTOR

MANUEL OCTAVIO VALCUENDE PAYÁ

COTUTOR

JOSEP RAMON LLISO FERRANDO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Curso 2019-2020



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
ENGINYERIA
D'EDIFICACIÓ

Máster en edificación
ETS de Ingeniería de Edificación
Universitat Politècnica de València



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme viajar fuera de mi país para formarme y crecer profesionalmente, por darme la salud, los recursos, la sabiduría y la perseverancia, para realizar este proyecto y culminarlo con éxito.

Por otra parte, agradecer al Dr. Juan Soto Camino y el Dr. José Manuel Gandía por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, por compartirme sus conocimientos como docentes, guiarme y apoyarme durante todo el tiempo que me han permitido acompañarlos como parte de su grupo de investigación.

A los tutores de este trabajo final de Máster, el Dr. Manuel Valcuende y Josep Lliso, por su apoyo en todo el proceso que tomó realizar este proyecto, porque, gracias a sus conocimientos e ideas fue posible la realización de este. En especial a Josep ya que, gracias a su orientación y colaboración en cada labor que implicó ejecutar este trabajo, se logró finalizar el proyecto de investigación.

A mis padres, por su apoyo incondicional durante este tiempo de aprendizaje; por motivarme a continuar y seguir creciendo profesionalmente. Por último, a todos aquellos que de alguna manera formaron parte de este gratificante proceso de manera directa o indirecta, brindándome su apoyo y motivación.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster

RESUMEN

Este trabajo experimental tiene como objetivo principal analizar los procesos de las corrientes de macrocelda en estructuras de hormigón armado, para poder así determinar su importancia en los procesos de corrosión de estas estructuras.

Inicialmente se llevó a cabo una revisión de los contenidos bibliográficos acerca de los procesos de corrosión en las estructuras de hormigón armado, centrándose el estudio en la corrosión generada por las corrientes de macrocelda.

A nivel práctico, se diseñó un plan experimental que permitiera obtener resultados similares a los que se obtendrían en una estructura real. En este sentido, se construyó una losa de hormigón armado a escala reducida (800 x 1400 x 100 mm), que consta de dos zonas, una contaminada con cloruros y otra sin contaminar. Esta estrategia permite generar dos regiones, una donde las armaduras están bajo una corrosión activa debido a la presencia de los cloruros, y otra en la que las armaduras se mantienen en un estado pasivo y los valores de corrosión son bajos.

Para determinar la corriente de corrosión localizada (i_{local}) y la corriente de macrocelda (i_{macro}) se embebieron diversos sensores en la losa y su análisis se llevó a cabo mediante técnicas de medida electroquímicas. Paralelamente, se hormigonaron una serie de probetas para caracterizar el hormigón empleado.

PALABRAS CLAVE:

CORRIENTES DE CORROSIÓN, MACROPAR GALVÁNICO, CORRIENTES DE MACROCELDA, MONITORIZACIÓN

ABSTRACT

The main objective of this experimental work is to analyse the processes of macrocell currents in reinforced concrete structures, in order to determine its importance in the corrosion processes in this kind of structures.

First, a review of the bibliographic existing documents about corrosion processes in reinforced concrete structures has been carried out, focusing the study on the corrosion generated by macrocell currents.

At the practical level, a pilot scheme has been designed to obtain results like those that can be found in a real structure. With this aim, a reinforced concrete slab has been built on a reduced scale (800 x 1400 x 100 mm) and then part of it has been contaminated with chlorides while the rest has left unpolluted. This strategy allowed characterizing two different zones, one where the reinforcements are under active corrosion due to the presence of chlorides and another one in which the armatures are kept in a passive state and the corrosion values are low.

To determine the localized corrosion current (i_{local}) and the macrocell current (i_{macro}) various sensors have been embedded in the slab. The measures were carried out using electrochemical measurement techniques. In parallel, a series of specimens have been made in order to characterize the concrete used for the slab.

After the planned curing time, concrete characterization tests and measurements of corrosion intensities and macrocell have been carried out; finally, the results have been analysed and conclusions have been drawn.

KEY WORDS

CURRENTS OF CORROSION, GALVANIC MACROPAR, CURRENTS OF MACROCELL, MONITORING

RESUM

Aquest treball experimental té com a objectiu principal analitzar els processos dels corrents de macrocelda en estructures de formigó armat, per determinar la seua importància en els processos de corrosió d'aquest tipus d'estructures.

En primer lloc, es va portar a terme una revisió dels continguts bibliogràfics al voltant dels processos de corrosió en les estructures de formigó armat. Es va centrar l'estudi en la corrosió generada pels corrents de macrocelda.

En l'àmbit pràctic, es va dissenyar un pla experimental que ajudara a obtenir resultats similars als que es poden trobar en estructures reals. En aquest sentit, es va construir una llosa de formigó armat a escala reduïda (800 x 1400 x 100 mm), que està dividida en dues zones, una contaminada amb clorurs i altra sense contaminar. Aquesta estratègia permet generar dues regions, una on les armadures es troben en una corrosió activa per la presència de clorurs, i altra, on els reforços es mantenen en un estat passiu i, els valors de corrosió, són relativament baixos.

Per determinar el corrent de corrosió local (i_{local}) i el corrent de macrocelda (i_{macro}), es van incloure diferents sensors en la llosa. Les mesures es varen realitzar mitjançant tècniques de mesura electroquímica. Paral·lelament, es varen formigonar una sèrie de provetes per poder caracteritzar el formigó que es va utilitzar.

PARAULES CLAU:

CORRENTS DE CORROSIÓ, MACROPAR GALVÀNIC, CORRENTS DE MACROCELDA, MONITORATGE



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster



INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. <i>Objetivo principal</i>	2
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2. ESTRATEGIA GENERAL	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. CORROSIÓN	5
2.2. CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO	5
2.2.1. <i>Proceso de corrosión en las armaduras del hormigón</i>	7
2.2.2. <i>Elementos que originan la corrosión</i>	11
2.3. MICROCELDAS Y MACROCELDAS DE CORROSIÓN	14
2.3.1. <i>Microceldas o micropilas</i>	15
2.3.2. <i>Macrocelas o macropilas</i>	16
2.4. TÉCNICAS DE MEDIDA DE CORROSIÓN	24
2.4.1. <i>Métodos cualitativos</i>	24
2.4.2. <i>Métodos cuantitativos</i>	27
2.4.3. <i>Sistema de sensores embebidos en hormigón armado</i>	37
CAPÍTULO 3. PLAN EXPERIMENTAL	43
3.1. INTRODUCCIÓN	43
3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	43
3.3. LOSA DE HORMIGÓN ARMADO	44
3.3.1. <i>Proceso de construcción</i>	45
3.4. HORMIGÓN	49
3.4.1. <i>Dosificación</i>	49
3.4.2. <i>Hormigonado</i>	49
3.5. TRABAJOS PREVIOS A LAS MEDIDAS DE CORROSIÓN	54
3.5.1. <i>Acondicionamiento de la losa</i>	54
3.5.2. <i>Localización de la armadura</i>	54
CAPÍTULO 4. MEDIDAS	55
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	55
4.1.1. <i>Resistencia a la compresión</i>	55
4.1.2. <i>Absorción – porosidad</i>	56
4.1.3. <i>Capilaridad</i>	56
4.1.4. <i>Migración de cloruros</i>	57
4.1.5. <i>Resistividad eléctrica</i>	58
4.2. ENSAYOS EN LA LOSA	58
4.2.1. <i>Mapeo de potenciales</i>	58
4.2.2. <i>Medida de intensidad de macrocelda (i_{macro})</i>	59
4.2.3. <i>Medida de intensidad de corrosión (i_{local})</i>	61
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	67
5.1. INTRODUCCIÓN	67
5.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	67



5.3.	MAPEO DE POTENCIALES	68
5.4.	MEDIDAS DE LOS PARÁMETROS DE CORROSIÓN	71
5.4.1.	<i>Potencial eléctrico sensores (E_{corr})</i>	71
5.4.2.	<i>Resistencia a la polarización (R_p)</i>	72
5.4.1.	<i>Capacidad de la doble capa (C_{dl})</i>	73
5.4.2.	<i>Densidad de corriente (j_{corr})</i>	74
5.4.3.	<i>Densidad de corriente de macrocelda (j_{macro})</i>	75
5.4.4.	<i>Densidad de corriente total (j_{total})</i>	76
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		79
CAPÍTULO 7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN		81
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA		83

INDICE DE FIGURAS

FIGURA. 2-1. ALGUNOS TIPOS DE CORROSIÓN. IMAGEN ADAPTADA DE (KANEMATSU & BARRY, 2016) Y (UNIVERSIDAD DE CANTABRIA)	5
FIGURA. 2-2. EJEMPLOS DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO. ((HUME INGENIERÍA, 2015), (MENESES, MORO, ALVEDAÑO, & ORTEGA, 2007)).....	7
FIGURA. 2-3 ESQUEMA DE CORROSIÓN EN UNA SOLUCIÓN ÁCIDA ADAPTADA DE (GANDIA ROMERO, 2014)	8
FIGURA. 2-4. ESQUEMA DE CORROSIÓN EN UNA SOLUCIÓN AIREADA ADAPTADA DE (GANDIA ROMERO, 2014).....	9
FIGURA. 2-5. DIAGRAMA DE POURBAIX FE A 25°C (POURBAIX, 1974).....	10
FIGURA. 2-6. DIAGRAMA DE POURBAIX- REGIONES. ADAPTADA DE (OCHOA FERNÁNDEZ, 2019).....	10
FIGURA. 2-7 CARBONATACIÓN EN EL HORMIGÓN. (FUENTE PROPIA).....	12
FIGURA. 2-8. CLASES DE EXPOSICIÓN MARINA, (CEB, 1998).....	13
FIGURA. 2-9. CORROSIÓN EN ACERO POR PICADURA.(FUENTE PROPIA)	14
FIGURA. 2-10. MICROPILA Y MACROPILA ADAPTADA DE (RAMÓN ZAMORA, 2018)	15
FIGURA. 2-11. MICROESTRUCTURA ACERO (A: FERRITA). (MARTÍNEZ IBERNÓN, 2017)	15
FIGURA. 2-12. CORROSIÓN POR MACROCELDA INDUCIDA POR CLORUROS. (YOUNG-SHEN , WEN ZHAO, MIN ZHOU, HUI-RONG, & PING, 2013)	16
FIGURA. 2-13. CURVAS DE POLARIZACIÓN DEL ACERO EN EL HORMIGÓN EN ESTADO PASIVO. (YOUNG-SHEN , WEN ZHAO, MIN ZHOU, HUI-RONG, & PING, 2013)	17
FIGURA. 2-14. CURVAS DE POLARIZACIÓN DEL ACERO EN EL HORMIGÓN EN ESTADO ACTIVO. (YOUNG-SHEN , WEN ZHAO, MIN ZHOU, HUI-RONG, & PING, 2013).	18
FIGURA. 2-15. ESQUEMA DE PIEZA DE METAL EN ESTADO PASIVO Y ACTIVO. (FUENTE PROPIA).....	19
FIGURA. 2-16. CORRIENTES DE MACROCELDA ENTRE ACERO PASIVO Y ACTIVO CUANDO ESTOS DOS ESTÁN EN CONTACTO ELÉCTRICO EN UN ELECTROLITO. (YOUNG-SHEN , WEN ZHAO, MIN ZHOU, HUI-RONG, & PING, 2013).	19
FIGURA. 2-17. EJEMPLO DEL EFECTO DE MACROCELDA POR AIREACIÓN DIFERENCIAL – ESTRUCTURAS ENTERRADAS O SEMIENTERRADAS, ADAPTADA DE (BERTORLINI, ELSENER, PEDEFERRI, REDAELLI, & POLDER, 2013).....	21
FIGURA. 2-18. EJEMPLO DEL EFECTO DE MACROCELDA POR ATAQUE DE CLORUROS – ESTRUCTURAS SUMERGIDAS, ADAPTADA DE (BERTORLINI, ELSENER, PEDEFERRI, REDAELLI, & POLDER, 2013)	22
FIGURA. 2-19. EJEMPLO DE CORROSIÓN POR EL EFECTO DE MACROCELDA DEBIDO A LA CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN (FUENTE PROPIA).	23
FIGURA. 2-20. ESQUEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIAL DE CORROSIÓN (E_{CORR}) SOBRE UNA SUPERFICIE DE HORMIGÓN. (UNE 112083, 2010)	24
FIGURA. 2-21. PROBABILIDAD O RIESGO DE CORROSIÓN ACTIVA. (UNE 112083, 2010).	25
FIGURA. 2-22. EJEMPLO DE MAPEO DE POTENCIALES DE CORROSIÓN. (RAMÓN ZAMORA, 2018).	26
FIGURA. 2-23. ESQUEMA DE MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA POR EL MÉTODO DIRECTO. (UNE 83988-1, 2008).....	27
FIGURA. 2-24. ESQUEMA DE CELDA DE MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN. ESQUEMA ADAPTADO DE (RAMÓN ZAMORA, 2018).	28
FIGURA. 2-25. DIAGRAMA DEL MÉTODO DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL. (RAMÓN ZAMORA, 2018)	30
FIGURA. 2-26. CIRCUITO ELÉCTRICO PROPUESTO POR RANDES PARA MODELIZAR LA INTERFAZ ACERO-HORMIGÓN. ADAPTADA DE (RANDES, 1947)	32
FIGURA. 2-27. SECUENCIA BÁSICA DE ESCALONES DE POTENCIAL. ADAPTADA DE (RAMÓN ZAMORA, 2018).....	33
FIGURA. 2-28. CURVAS DE POLARIZACIÓN MÉTODO DE TAFEL - REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS A DETERMINAR EN EL MÉTODO ATE. (RAMÓN ZAMORA, 2018).....	34
FIGURA. 2-29. CIRCUITO EQUIVALENTE MIXTO, PROCESO (FARÁDICO - NO FARÁDICO) ADAPTADA DE. (RAMÓN ZAMORA, 2018).....	35
FIGURA. 2-30. ESQUEMA DE SECUENCIA DE PULSOS POTENCIOSTÁTICOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ATE. ADAPTADA DE (RAMÓN ZAMORA, 2018)	36
FIGURA. 2-31. DISTINTOS EJEMPLOS DE SOPORTE DE SENSOR A LA ARMADURA. (RAMÓN ZAMORA, 2018).....	38

FIGURA. 2-32. ESQUEMA DEL SENSOR DE MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN. ADAPTADA DE (RAMÓN ZAMORA, 2018) ..	38
FIGURA. 2-33. ESQUEMA DE OPERACIÓN DEL SENSOR EMBEBIDO EN EL HORMIGÓN ARMADO. (RAMÓN ZAMORA, 2018) ...	40
FIGURA. 3-1. ESQUEMA GENERAL ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO - LOSA (FUENTE PROPIA).....	44
FIGURA. 3-2. IMPRESORA 3D (FUENTE PROPIA).	45
FIGURA. 3-3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE SENSORES (FUENTE PROPIA)	46
FIGURA. 3-4. DISPOSICIÓN DEL ARMADO DE LA LOSA (FUENTE PROPIA).....	47
FIGURA. 3-5. UBICACIÓN DE SENSORES (FUENTE PROPIA).....	48
FIGURA. 3-6. PROCESO DE ARMADO Y UBICACIÓN DE SENSORES. (FUENTE PROPIA).	49
FIGURA. 3-7. PREPARACIÓN DE MATERIAL PARA LA PRIMERA AMASADA. (FUENTE PROPIA)	50
FIGURA. 3-8. ENCOFRADO DE LOSA DE HORMIGÓN, SEPARACIÓN DE ZONAS (FUENTE PROPIA).....	51
FIGURA. 3-9. PROCESO DE DOSIFICACIÓN (FUENTE PROPIA).....	52
FIGURA. 3-10. HORMIGONADO ZONA CONTAMINADA Cl ⁻ (FUENTE PROPIA).....	52
FIGURA. 3-11. HORMIGONADO SEGUNDA ETAPA SIN CONTAMINAR. (FUENTE PROPIA).	52
FIGURA. 3-12. HORMIGONADO PROBETAS DE CARACTERIZACIÓN. (FUENTE PROPIA).....	53
FIGURA. 3-13. ESTADO FINAL DE HORMIGONADO (FUENTE PROPIA).....	53
FIGURA. 3-14. LOSA DE HORMIGÓN ARMADO (FUENTE PROPIA).....	53
FIGURA. 3-15. HUMECTACIÓN DE LA LOSA (FUENTE PROPIA).	54
FIGURA. 3-16. LOCALIZACIÓN ARMADURAS "PACHOMETRO" (FUENTE PROPIA).....	54
FIGURA. 4-1. ENSAYO DE RESISTENCIA DE COMPRESIÓN (FUENTE PROPIA).	55
FIGURA. 4-2. PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS SEGÚN UNE 83966. (FUENTE PROPIA).....	56
FIGURA. 4-3. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD NORMA UNE 83982 (FUENTE PROPIA).	57
FIGURA. 4-4. ESQUEMA DE ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS ADAPTADA DE (NT BUILD 492, 1999).....	57
FIGURA. 4-5. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SEGÚN NORMA UNE 83988-1 MÉTODO DIRECTO (FUENTE PROPIA).....	58
FIGURA. 4-6. CUADRICULA PARA MAPEO DE POTENCIALES (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA. 4-7. PROCESO DE MEDIDAS DE POTENCIALES ELÉCTRICOS (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA. 4-8 . MEDIDA CON AMPERÍMETRO DE RESISTENCIA NULA (ZRA)(FUENTE PROPIA).....	60
FIGURA. 4-9. ESQUEMA DE MEDIDA DE CORRIENTES DE MACROCELDA SENSOR - ARMADURA. (FUENTE PROPIA).....	60
FIGURA. 4-10. RECOPIACIÓN DE IMAGEN DEL CAPÍTULO 2 - ESQUEMA DE SECUENCIA DE PULSOS POTENCIOSTÁTICOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ATE. (RAMÓN ZAMORA, 2018).....	61
FIGURA. 4-11. GRÁFICA DE RESPUESTA ELÉCTRICA DE LA SECUENCIA DE PULSOS APLICADA PARA UN SENSOR EMBEBIDO EN LA LOSA DE HORMIGÓN.....	61
FIGURA. 4-12. AJUSTE DE CURVAS DE RESPUESTA ELÉCTRICA PARA LOS PULSOS $\pm 70\text{mV}$	62
FIGURA. 4-13. AJUSTE DE CURVAS DE RESPUESTA ELÉCTRICA PARA LOS PULSOS $\pm 105\text{mV}$	62
FIGURA. 4-14. EJEMPLO DE SALTOS DE RESPUESTA A LOS PULSOS.	63
FIGURA. 4-15. AJUSTE DE CURVAS DE RESPUESTA ELÉCTRICA PARA LOS PULSOS $\pm 140\text{mV}$	63
FIGURA. 4-16. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MÉTODO ATE PARA UN SENSOR EMBEBIDO EN LA LOSA DE HORMIGÓN	64
FIGURA. 4-17. ESQUEMA DE MEDIDAS DE CORRIENTES DE CORROSIÓN EN LOSA DE HORMIGÓN.(FUENTE PROPIA)	65
FIGURA. 4-18. PROCESO DE MEDIDA DE INTENSIDAD DE CORRIENTES CON EL MÉTODO DE PULSOS POTENCIOSTÁTICOS. (FUENTE PROPIA)	65
FIGURA. 4-19. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE SENSORES A LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS. (FUENTE PROPIA).	66
FIGURA. 5-1. MAPA DE POTENCIALES ELÉCTRICOS (mV) 30/07/2020.....	69
FIGURA. 5-2. RECOPIACIÓN DE IMAGEN DEL CAPÍTULO 2 - PROBABILIDAD O RIESGO DE CORROSIÓN ACTIVA. (UNE 112083, 2010).....	69
FIGURA. 5-3. MAPA DE POTENCIALES ELÉCTRICOS (mV) 11/09/2020.....	70
FIGURA. 5-4. MAPA DE POTENCIALES ELÉCTRICOS (mV) 18/12/2020.....	71
FIGURA. 5-5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE POTENCIAL DE CORROSIÓN DE LOS SENSORES EMBEBIDOS EN LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	72



FIGURA. 5-6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE R_p PARA LOS SENSORES EMBEBIDOS EN LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO (FUENTE PROPIA).	73
FIGURA. 5-7. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE LA CAPACIDAD DE LA DOBLE CAPA	74
FIGURA. 5-8. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE DENSIDAD DE CORRIENTE J_{CORR} DE LOS SENSORES EMBEBIDOS EN LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.	75
FIGURA. 5-9. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE MACROCELDA J_{MACRO} EN LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.	76
FIGURA. 5-10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL EN LAS ARMADURAS DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	77

INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. VALORES LÍMITE DE DENSIDAD Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEGÚN UNE 112072.	29
TABLA 3-1. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN UTILIZADO PARA UN METRO CÚBICO.(FUENTE PROPIA)	49
TABLA 3-2. PROBETAS PARA ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.(FUENTE PROPIA).....	50
TABLA 5-1. RESULTADO DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.(FUENTE PROPIA)	67
TABLA 5-2. CLASIFICACIÓN DE DURABILIDAD HORMIGÓN DE TRABAJO. (FUENTE PROPIA).....	67
TABLA 5-3. INDICADOR DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN. (WANG, Y OTROS, 2013)	68

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión en el hormigón armado es uno de los principales factores que pone en riesgo la seguridad de este tipo de estructuras. A lo largo del tiempo se ha comprobado la importancia que este fenómeno tiene y el beneficio de prevenir el daño que produce, ya que el impacto que se genera en las estructuras de hormigón armado es de una gran importancia económica.

Debido a ello, la normativa española “EHE-08” en su capítulo 7¹ establece una serie de criterios para garantizar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Además, en la actualidad, muchos centros de investigación han centrado sus esfuerzos en la búsqueda de métodos para monitorizar este fenómeno y controlar, prevenir o mitigar los procesos de corrosión en las armaduras de una estructura de hormigón armado.

En el departamento de construcciones arquitectónicas de la Universitat Politècnica de València (UPV), el grupo de investigación conformado por los miembros del Laboratorio de Electroquímica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE) ha desarrollado y patentado un sistema de monitorización de las armaduras embebidas en hormigón. Este sistema es capaz de detectar si las armaduras se encuentran sometidas a procesos de corrosión y poder estimar la velocidad a la que este proceso sucede, mediante el uso de sensores embebidos en el hormigón.

El trabajo que esta memoria recoge se sirve de este sistema desarrollado en el laboratorio, denominado INESSCOM (Integrated Network System for Corrosion Monitoring) para realizar un estudio sobre un elemento estructural a escala, en este caso una losa de hormigón armado.

Este trabajo, además, se centra en el análisis de las corrientes de macrocelda y su inserción en el modelo de medida existente. Estas corrientes se generan por las diferencias electroquímicas entre las distintas regiones que se forman en la superficie de la armadura. En la mayoría de los sistemas de medida y monitorización, estas corrientes no se tienen en cuenta a la hora de analizar los procesos de corrosión.

El plan experimental de este trabajo se desarrolla sobre una losa, la cual ha sido parcialmente contaminada con cloruros durante el proceso de fabricación. Este hecho condiciona la existencia de una zona activa, contaminada por cloruros, y una zona pasiva, ambas conectadas eléctricamente, tal y como sucedería en una estructura real. Todo esto propiciará la existencia de corrientes de macrocelda. Con este trabajo se espera determinar verdaderamente la influencia de estas en un caso real.

¹ Ministerio de fomento. (2008). *EHE-08. Instrucción de hormigón estructural*. España. Título 4 – capítulo 7, “Durabilidad” pag 141.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo principal

- Analizar la influencia que tienen las corrientes de macrocelda en los procesos de corrosión en las estructuras de hormigón armado, para determinar la importancia de su monitorización.

1.1.2. Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía existente acerca de los procesos de corrosión en las armaduras embebidas en hormigón, con especial énfasis en la corrosión generada por la macrocelda y sus técnicas de medida.
- Determinar las propiedades físicas del hormigón relacionadas con la durabilidad.
- Obtener los parámetros electroquímicos relacionados con la cinética de la corrosión (R_p , C_{dl}) que ayuden a entender los procesos de corrosión que se están produciendo.
- Determinar las corrientes de corrosión local (i_{local}).
- Determinar las corrientes de macrocelda que se producen en una estructura (i_{macro}) y valorar su influencia en la corrosión total.
- Detectar en una estructura las zonas que actúan como ánodo y las que actúan como cátodo, pudiendo así conocer con mayor precisión las zonas que están sufriendo los procesos de corrosión

1.2. ESTRATEGIA GENERAL

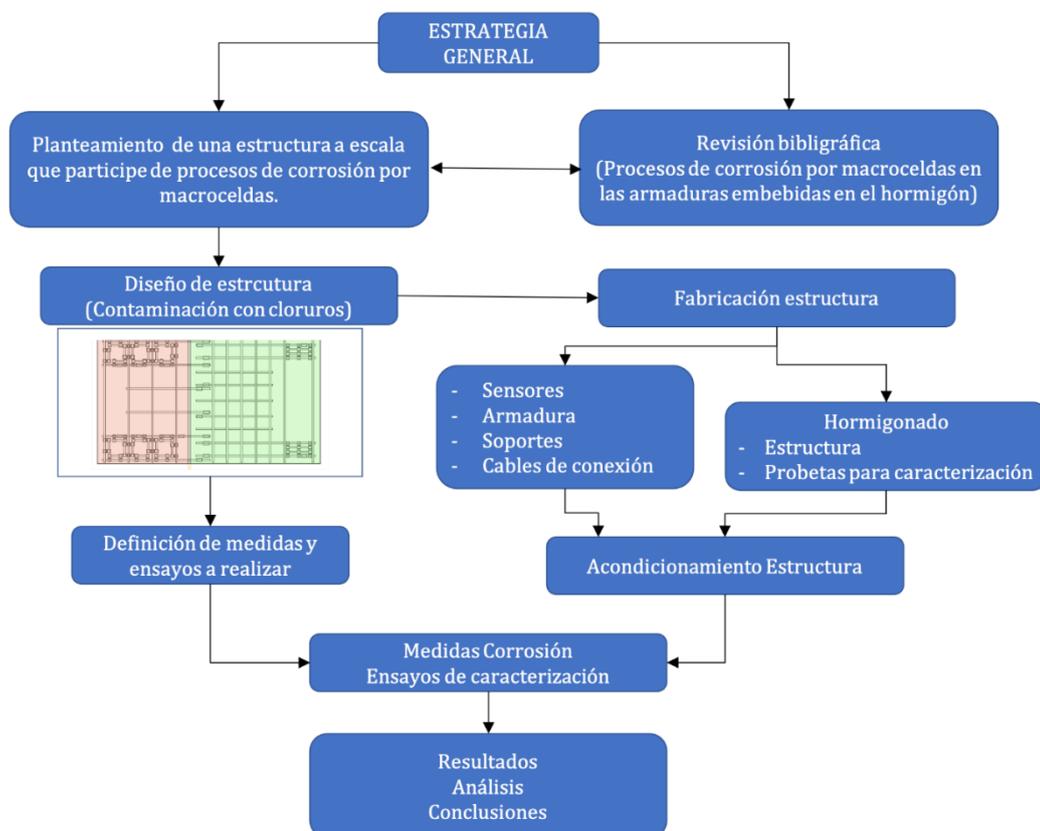
Para llevar a cabo este trabajo, se planteó una metodología que permitiera cumplir los objetivos marcados, con la siguiente estructura:

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica con el fin de profundizar en el conocimiento de la corrosión en el hormigón armado y principalmente en la corrosión producida por el efecto de las corrientes de macrocelda.

Paralelamente a la revisión de material bibliográfico, se planteó la construcción de una estructura a escala que propicie la aparición de los procesos de corrosión por macrocelda, mediante la contaminación con cloruros de parte de la misma.

Luego de haber planteado la idea de cómo estudiar los procesos de macrocelda, se comenzó con la fabricación de la estructura y todos los elementos (sensores, soportes, etc), necesarios para el estudio. Posteriormente, se definieron las medidas de corrosión y ensayos de caracterización que permitieran un estudio acertado.

La ejecución de la estructura permitió realizar la toma de medidas y obtención de datos, para poder realizar un análisis que condujera a la obtención de conclusiones de los objetivos propuestos.





CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. CORROSIÓN

El fenómeno de la corrosión se define como el desgaste o deterioro de un metal y sus aleaciones, fundamentalmente porque estos materiales tienden a volver a su estado natural, transformándose en óxidos por medio de procesos químicos y/o electroquímicos.

La Figura. 2-1, muestra distintos tipos de corrosión que pueden presentarse en el metal. Algunos de estos tipos son:

- **La corrosión húmeda**, la cual es de naturaleza electroquímica, esto quiere decir que se caracteriza por la presencia de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo.²

- **La corrosión generalizada**, una de las más comunes en los metales. Esta ocurre sobre la superficie del metal y se propaga de manera homogénea, lo que dificulta la identificación de ánodo y cátodo del proceso de corrosión.

- **La corrosión galvánica**, la cual se produce por la unión de distintos tipos de metal, debido a la diferencia de potencial de uno con respecto al otro. En este tipo de corrosión se tiende a corroer el metal con mayor electronegatividad.³



Figura. 2-1. Algunos tipos de corrosión. Imagen adaptada de (Kanematsu & Barry, 2016) y (Universidad de Cantabria)

2.2. CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

El hormigón armado es el material más utilizado para la construcción de estructuras debido a sus excelentes prestaciones en cuanto a durabilidad y capacidad mecánica. Pero el fenómeno de la corrosión en las armaduras embebidas en el hormigón es uno de los principales causantes de la disminución de vida útil de estas estructuras.

² Bermudez, R. (27 de Septiembre de 2015). *Slideshare*. Obtenido de Corrosión: <https://es.slideshare.net/reinaldozequea/corrosion>.

³ Ochoa Fernández, P. (2019). *Determinación de corrientes de macropar en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 2, sección 2.2.2 “Clasificación por aspecto superficial”, páginas 6-7.

Dicho fenómeno afecta directamente la durabilidad de este material y se considera la principal causa de fallo prematuro de las estructuras de hormigón armado.⁴ Por tal razón, es de vital importancia analizar los distintos métodos para detectar la corrosión y prevenirla, ya que cuando esta se hace visible en el exterior de las piezas, los daños en la estructura suelen estar muy avanzados, lo que dificulta su reparación.

El concepto de durabilidad del hormigón lo define la normativa española “EHE-08” como, “la capacidad de soportar durante su vida útil, para la cual ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que este expuesta”.⁵

Para garantizar la durabilidad del hormigón en el ámbito de la corrosión, se establecen diferentes tipos de ambientes y clases de exposición a los que estará expuesta la estructura. Para ello, el proyectista en la fase de diseño, los deberá tener en cuenta y con base en esto establecer los criterios que aseguren la durabilidad de la estructura. Otros aspectos que la norma indica y que el proyectista debe considerar durante la fase de diseño son: el tipo de cemento a utilizar, la dosificación del hormigón, el recubrimiento necesario de las armaduras y la separación entre barras. Además, durante la ejecución de la estructura, se debe hacer hincapié en un adecuado vertido y curado.⁶

En cuanto a la corrosión de las armaduras en el hormigón y siguiendo los principios de la termodinámica básica, el acero tiende a corroerse de manera natural. Sin embargo, la experiencia muestra que el acero en el hormigón no se corroe, a pesar de estar en condiciones de humedad y en presencia de oxígeno. Esto es debido a la alta alcalinidad que se genera en la matriz cementante inicialmente, la cual presenta valores de pH en un rango de 12.5 y 13.5.

En estas condiciones, se genera una capa de óxido muy densa e impermeable sobre la superficie del acero, llamada capa pasiva. Normalmente esta capa podría permanecer estable durante el tiempo de vida útil de la estructura.⁷ No obstante, la capa de óxido pasivante puede verse afectada por la presencia de sustancias agresivas que penetran a través de la red porosa del hormigón. Estos agentes agresivos penetran a través de la matriz porosa del hormigón y reaccionan con los diferentes compuestos existentes generando unos nuevos. Esta nueva estructura conduce a una variación en el pH de la

⁴ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Páginas 1-2.

⁵ Ministerio de fomento. (2008). EHE-08. Instrucción de hormigón estructural. Capítulo 7. Durabilidad. Artículo 37.1. Durabilidad del hormigón y de las armaduras. España.

⁶ Gandia Romero, J. M. (2014). Tesis doctoral, Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado. Valencia: Universitat Politècnica de València.

⁷ Raupach, M. (1995). Chloroide induced macrocell corrosion of steel in concrete - theoretical background and practical consequences. ElServier Science, 329-338.

disolución existente en el poro, capaz de desestabilizar la capa de óxidos pasivante y desencadenar procesos de corrosión activa.

Los principales agentes agresivos son la carbonatación, o penetración del CO₂ existente en la atmósfera, o la penetración del ion cloruro presente en el medio donde se encuentra la estructura de hormigón armado. La Figura. 2-2, muestra algunos ejemplos de estructuras expuestas a estos agentes agresivos.



Figura. 2-2. Ejemplos de corrosión en el hormigón armado. ((Hume ingeniería, 2015), (Meneses, Moro, Alvedaño, & Ortega, 2007))

2.2.1. Proceso de corrosión en las armaduras del hormigón.

El proceso por el cual se desarrolla la corrosión en las armaduras embebidas en hormigón armado se origina por reacciones químicas o electroquímicas que ocasionan el deterioro del metal. Este es en realidad un proceso “redox”, ya que actúan de manera simultánea reacciones de oxidación y reducción.

Para que estas reacciones electroquímicas se produzcan debe existir una transferencia de electrones entre zonas anódicas y catódicas. El flujo de electrones viaja a través del metal y esto solo sucede si hay presencia de un electrolito o disolución que permita la conducción iónica por la matriz cementante. Las reacciones de oxidación tienen lugar en

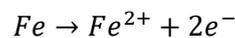
las zonas anódicas y las reacciones reducción en las zonas catódicas, donde el metal no se corroe.⁸

La reacción de oxidación tiene como objetivo satisfacer la demanda de electrones producida por las reacciones de reducción, que se generan simultáneamente por agentes que absorben los electrones para alcanzar un estado termodinámicamente más estable.

La conducción iónica producida en el circuito eléctrico formado por el hormigón y la armadura genera una transferencia de carga a través de la interfaz metal/disolución (ver Figura. 2-3).

El proceso de oxidación en las zonas anódicas tiene lugar en la superficie del metal donde se crea una transferencia de electrones, cuando el hierro metálico (Fe) se oxida, pierde electrones ($2e^-$) y libera cationes (Fe^{2+}) Dicha reacción se define en la reacción 2-1.

2-1



Los procesos o reacciones catódicas que se producen con mayor frecuencia son la reducción de protones en soluciones acidas (ver la reacción 2-2), o en soluciones neutras aireadas, cuando se combina el oxígeno disuelto con los electrones suministrados por el medio neutro y alcalino (ver reacción 2-3).

2-2

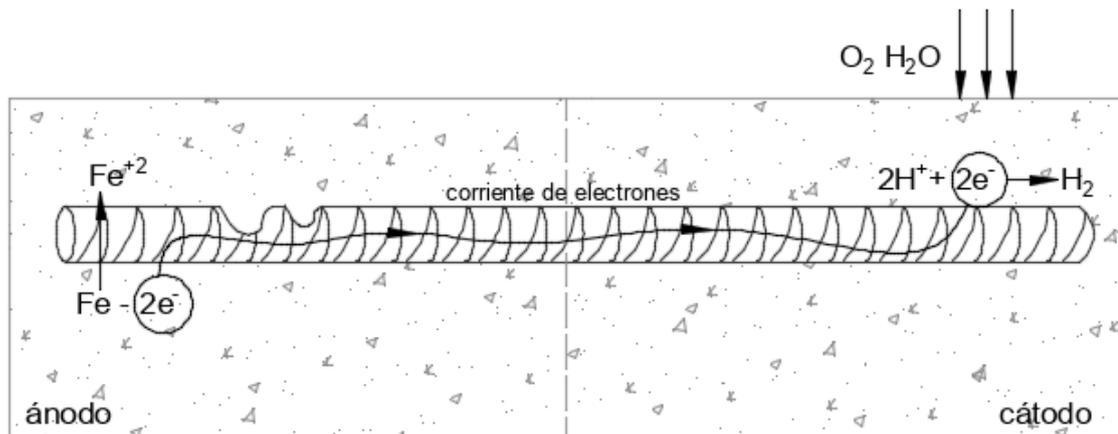
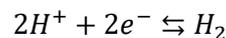
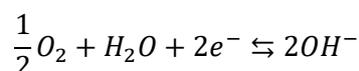


Figura. 2-3 Esquema de corrosión en una solución ácida adaptada de (Gandia Romero, 2014)

2-3



⁸ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 1 – sección 1.2 “Termodinámica de corrosión aplicada al hormigón armado”. Páginas 14-15.

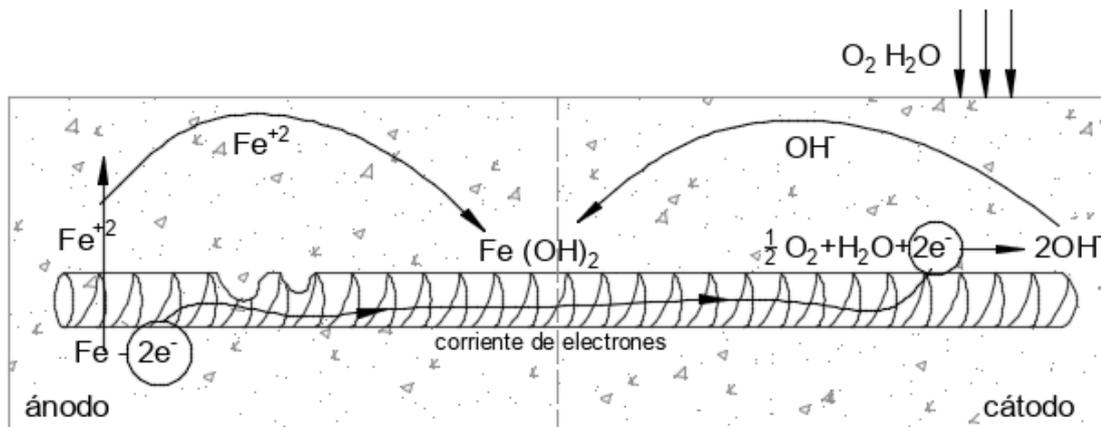


Figura. 2-4. Esquema de corrosión en una solución aireada adaptada de (Gandia Romero, 2014)

Estos procesos catódicos son capaces de romper el equilibrio alcanzado del sistema, debido a que genera una diferencia de potenciales eléctricos entre las zonas anódicas y catódicas, siendo el ánodo más negativo y el cátodo más positivo. Esto hace que se cree un cortocircuito a lo largo del propio metal y se complemente con la conducción de iones a través del hormigón.

La humedad influye sobre la resistencia eléctrica del hormigón y es uno de los factores que aceleran la corrosión junto con el oxígeno, ya que, si no existe presencia de estos dos agentes de manera simultánea, no se produce la corrosión.

Por tanto, el pH del entorno donde se localiza la armadura condiciona el comportamiento de esta frente al fenómeno de la corrosión. Este pH está estrechamente relacionado con el potencial de corrosión y ambos parámetros sirven de referencia para clasificar el estado de las armaduras. El profesor Pourbaix fue el primer investigador que generó una serie de diagramas de los diferentes metales en función del pH y su potencial. Estos diagramas permiten determinar la estabilidad termodinámica de las especies de un metal en un medio dado, es decir, es la representación gráfica del estado de un metal en condiciones estándar (agua a 25 °C). El diagrama tiene en sus ordenadas el potencial y en sus abscisas el pH, para poder establecer condiciones de pH y potencial para diferentes estados, lo que permite conocer el estado de equilibrio y lograr predecir los cambios ambientales que pueden propiciar la corrosión.⁹ (Ver Figura. 2-5).

⁹ Muñoz Portero, M. J. (2011). Características y usos de los diagramas de Pourbaix. Valencia: Universitat Politècnica de València.

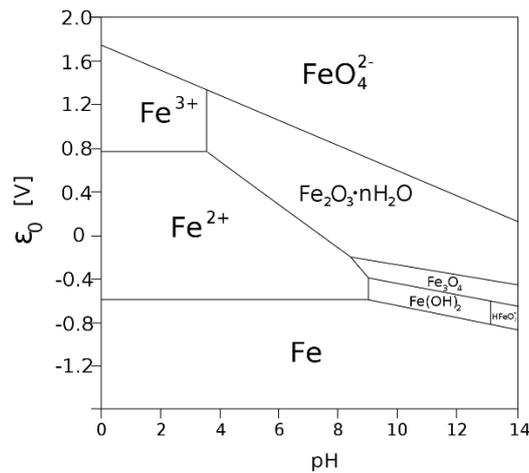


Figura. 2-5. Diagrama de Pourbaix Fe a 25°C (Pourbaix, 1974)

El diagrama de Pourbaix se puede clasificar en tres estados o regiones que se definen por el potencial y el pH en el que se encuentra el metal, como se muestra en la Figura. 2-6.¹⁰

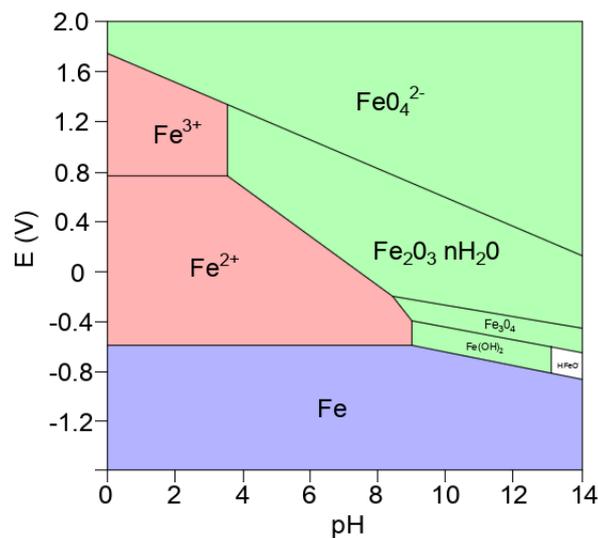


Figura. 2-6. Diagrama de Pourbaix- Regiones. Adaptada de (Ochoa Fernández, 2019)

- Estado pasivo: se representa de color verde en la Figura. 2-6, y define la región en la que el acero se encuentra protegido por la fina capa de óxidos definida anteriormente (capa pasiva). Esta región se alcanza cuando el metal, en este caso el acero, se sitúa en medios con una alta alcalinidad.
- Corrosión: se representa de color rojo en la Figura. 2-6. Esta región identifica el potencial electroquímico y pH en el que el acero tiende a volver a su estado original, a oxidarse. Esta región se alcanza en medios neutros. Es cuando se genera

¹⁰ Ochoa Fernández, P. (2019). *Determinación de corrientes de macropar en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 2, sección 2.3 “ Procesos de corrosión en estructuras de hormigón armado”, páginas 9-11.

el proceso anódico en el metal y se produce corrosión en el metal por la oxidación de este.

- Inmune: se representa de color azul en la Figura. 2-6. En esta región el metal no se corroe ya que permanece en las condiciones termodinámicas necesarias para no desencadenar el proceso de corrosión.

2.2.2. Elementos que originan la corrosión

En el medio en el que se localiza la estructura, hay agentes agresivos que pueden alterar la estabilidad de dicha capa de protección y provocar la corrosión en las armaduras. Dichos agentes pueden entrar por el hormigón a través de su red porosa, alcanzar las armaduras, y conseguir generar inestabilidad en la capa pasiva o descensos del pH de la estructura. Dicha inestabilidad puede conseguir la destrucción de esta capa de óxidos y propiciar las condiciones ideales para el desarrollo de la corrosión si se da la presencia de humedad y oxígeno.

Dos de los principales factores desencadenantes de la destrucción de la capa protectora de la armadura y precursores del inicio de la corrosión son: la contaminación con cloruros y la carbonatación del hormigón, que a continuación se detallan. Además, existen otros factores como la aireación diferencial y los procesos de macropar galvánico que pueden incrementar el fenómeno de la corrosión.

- **Carbonatación del hormigón**

La carbonatación está producida por la penetración del dióxido de carbono, que está presente en la atmósfera, a través de los poros del hormigón. Este agente es capaz de reaccionar con la portlandita modificando algunos de los componentes presentes en la matriz cementante. Esto provoca que la alcalinidad del hormigón se neutralice (descenso de pH) y se pueda volver inestable la capa protectora de las armaduras.

Esta desestabilización provoca que la armadura pase de un estado pasivo a un estado activo y se desencadene el proceso de corrosión de manera generalizada en la armadura.

La Figura. 2-7, muestra un ejemplo del ensayo de profundidad de carbonatación en el hormigón endurecido y, además, una muestra de armadura corroída a causa de la corrosión por carbonatación.

El ensayo de profundidad de carbonatación se realiza con un indicador de pH (disolución de fenolftaleína al 1%). La fenolftaleína toma color rosáceo - púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora en valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado).¹¹

¹¹ UNE 112011. (2011). *Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. AENOR.



Figura. 2-7 Carbonatación en el hormigón. (fuente propia).

- **Cloruros en el hormigón.**

Como se mencionó anteriormente, la carbonatación del hormigón y los iones despasivantes como los cloruros, son los principales factores que desencadenan la corrosión.

La contaminación por cloruros ocurre generalmente en ambientes marinos o zonas donde se utilizan sales para el deshielo, por lo que la normativa española “EHE-08”, como otras normativas y reglamentos, han establecido algunos aspectos para tener en cuenta, debido a la acción del ion cloruro, con el fin de asegurar la durabilidad de la estructura.

La “EHE-08” limita el contenido de cloruros para los diferentes tipos de hormigón; para un hormigón pretensado el contenido de cloruros no puede ser superior al 0,2% del peso del cemento; y para hormigones armados o en masa con armaduras para reducir la figuración, no pueden ser superiores al 0,4% del peso del cemento.¹²

Para garantizar la durabilidad de la estructura y prevenir posibles daños en la estructura. La “EHE-08”, define clases de exposición ambiental en relación con la corrosión de las armaduras, que están determinadas según el tipo de proceso al que estas pueden estar expuestas. Por ejemplo, al ataque por cloruros en ambientes marinos (IIIa, IIIb, IIIc) y por cloruros de origen no marino (IV) ¹³.

¹² Ministerio de fomento. (2008). EHE-08. Capítulo 6: Materiales, Artículo 31,1. Composición de los hormigones. Instrucción de hormigón estructural. España.

¹³ Ministerio de fomento. (2008). EHE-08. Capítulo 2: Criterios de seguridad y bases de calculo, Artículo 8,2,2. Instrucción de hormigón estructural. España

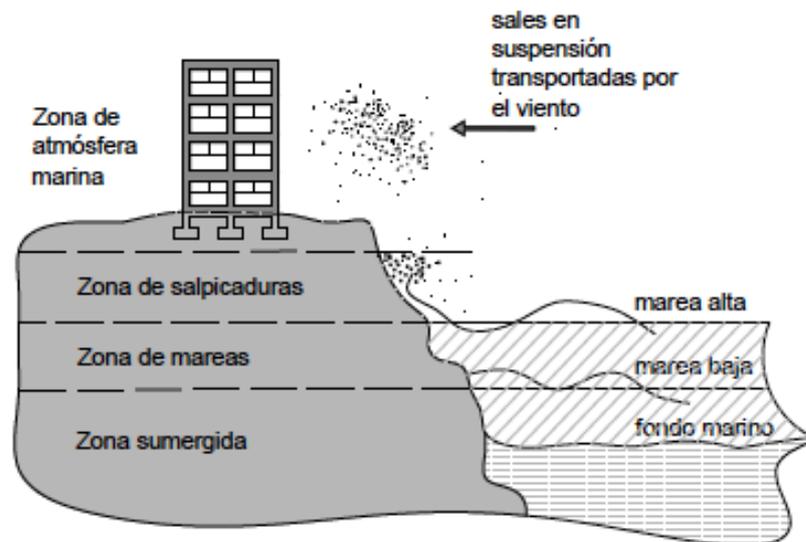


Figura. 2-8. Clases de exposición marina, (CEB, 1998)

Los iones cloruros penetran a través de la matriz cementante, sin embargo, a diferencia de la carbonatación, la despasivación de las armaduras se produce de manera puntal, y se define como corrosión por picaduras.

La Figura. 2-9, muestra un ejemplo de cómo se ve afectada la barra ante el ataque del ion cloruro. En estas imágenes se puede apreciar la disminución de la sección en cada una de las armaduras mostradas que se produce de manera puntal (picadura).

En las zonas del metal donde ocurre corrosión por picaduras, se forman ánodos puntuales y el entorno de la picadura actúa como cátodo, dado que las reacciones de oxidación y reducción se producen muy cerca la una de la otra. El proceso de corrosión se acelera y así mismo la pérdida de sección de la armadura.



Figura. 2-9. Corrosión en acero por picadura. (fuente propia)

2.3. MICROCELDAS Y MACROCELDAS DE CORROSIÓN

La corrosión puede producirse de dos maneras diferentes, según el proceso de transferencia iónica.

El primer caso se produce por las diferencias en la naturaleza granular de la que está compuesta el acero, dando lugar a polarización entre zonas y creando micropilas. La corrosión a nivel microestructural se desarrolla por la transferencia electrónica entre dichas zonas, que no se alcanzan a diferenciar a simple vista.

La corrosión a nivel macroestructural se desarrolla debido a la existencia de regiones con diferente estado electroquímico y distanciadas entre ellas a lo largo de la superficie de la armadura. Para que ésta se pueda producir, el acero afectado por la corrosión debe estar conectado eléctricamente a las zonas pasivas. De esta manera el acero en la zona anódica comienza su oxidación y transferencia electrónica a la zona pasiva, fenómeno conocido como macropila o macrocelda.

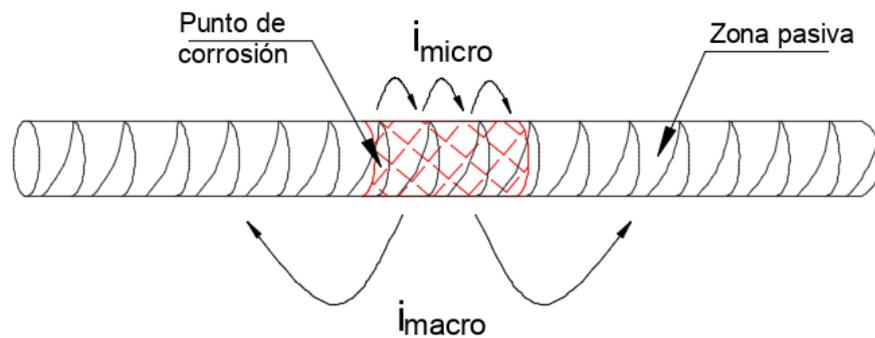


Figura. 2-10. Micropila y macropila adaptada de (Ramón Zamora, 2018)

2.3.1. Microceldas o micropilas

Las microceldas se producen por la heterogeneidad de los componentes microscópicos del acero. La diferencia de energía libre de cada compuesto define la microcelda en dos zonas de la estructura a nivel microscópico. La zona anódica, localizada en el borde del grano y la zona catódica en el grano.

El acero utilizado para las armaduras generalmente está compuesto por un 0,13% de carbono y presenta una distribución de fases como se puede observar en la Figura. 2-11.¹⁴



Figura. 2-11. Microestructura acero (α : Ferrita). (Martínez Ibernón, 2017)

La diferencia de energía entre fases genera las microceldas en el acero, produciéndose así, la corrosión micro (i_{micro}).

¹⁴ Martínez Ibernón, A. (2017). Modelización de procesos de macropar galvánico en estructuras de hormigón armado. Valencia: Universitat politècnica de València, Capítulo 2, sección 2.7.1. "Microceldas o micropilas", paginas 72-74.

2.3.2. Macroceldas o macropilas

Las macroceldas, como se mencionó anteriormente, se producen por la diferencia de potencial que se genera entre la zona activa y la zona pasiva de la armadura. Los procesos anódicos y catódicos se dan en distintas superficies del metal, lo que conlleva a un traspaso de corriente eléctrica entre diferentes zonas. Esta corriente es la producida por el efecto de la macrocelda.

La corriente de macrocelda depende de la diferencia de potencial entre las zonas pasivas y activas, así como de la resistividad del hormigón. Las zonas pasivas (cátodos) suelen tener mayor superficie metálica que la zona activa (ánodo). Esta diferencia de superficies es el origen de la corriente de macrocelda, que a su vez acelera el proceso de corrosión en la zona anódica y le otorga un mayor grado de estabilización a la capa protectora en la zona catódica.

Generalmente, las barras embebidas en hormigón armado están conectadas eléctricamente entre sí, razón por la cual, la superficie de la zona pasiva es desconocida y mucho mayor a la zona activa. Esta relación de superficies condiciona la velocidad a la que se corroe la zona anódica.

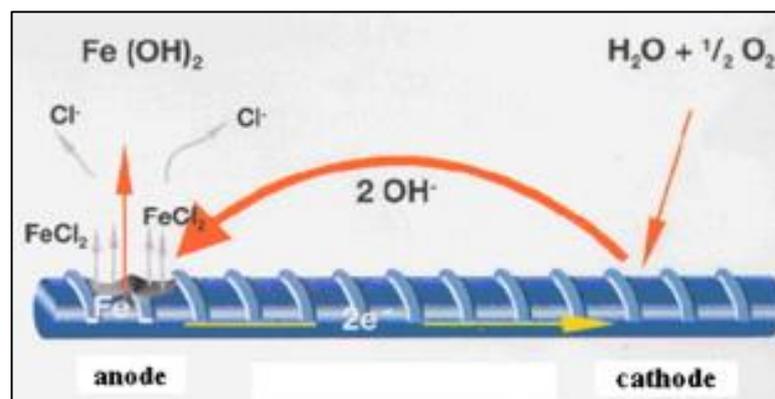


Figura. 2-12. Corrosión por macrocelda inducida por cloruros. (Young-Shen, Wen Zhao, Min Zhou, Hui-rong, & Ping, 2013)

Una aproximación que define de manera clara el proceso de la corrosión debido a la macrocelda, son los diagramas de Evans.

2.3.2.1. Diagramas de Evans

Los diagramas de Evans son la representación gráfica de las curvas de polarización anódica y catódica superpuestas en un mismo gráfico. Ambas curvas son las que representan el estado de un electrodo situado en una disolución. Para una única pieza de metal (electrodo) sumergida en un electrolito o disolución, su estado queda definido por las reacciones anódicas y catódicas que se producen a lo largo de su superficie. Cada una de estas reacciones se representa mediante una curva. Dichas curvas se presentan de distinta forma de acuerdo con el estado del electrodo. La intersección de ambas curvas indica el valor electroquímico (potencial) y cinético (intensidad de corrosión) del electrodo.

Por tanto, si la pieza de metal está sumergida en una disolución que genera las condiciones de pH propicias para encontrarse en estado pasivo, las curvas anódica y catódica tomarán cierta forma (Figura. 2-13). Sin embargo, si el estado del electrodo es activo, la forma de estas curvas cambiará (Figura. 2-14).

El pH del hormigón normalmente se encuentra entre 12,5 y 13, esto protege a la armadura de la corrosión, ya que se forma una pequeña capa pasiva sobre la superficie del acero. Para el acero en estado pasivo, el circuito abierto de potencial es alto, y el valor de la intensidad de corrosión es baja. Las reacciones generales se pueden representar mediante curvas de polarización anódica (A) y catódica (C), como se muestra en la Figura. 2-13.

Como se exponía anteriormente, una vez los agentes agresivos alcanzan las armaduras, estas, sin la capa pasiva, desarrollan los procesos de corrosión en presencia de oxígeno y agua. Este proceso de corrosión en el acero en estado activo puede representarse según las curvas de polarización anódica (A) y catódica (C) de la Figura. 2-14.

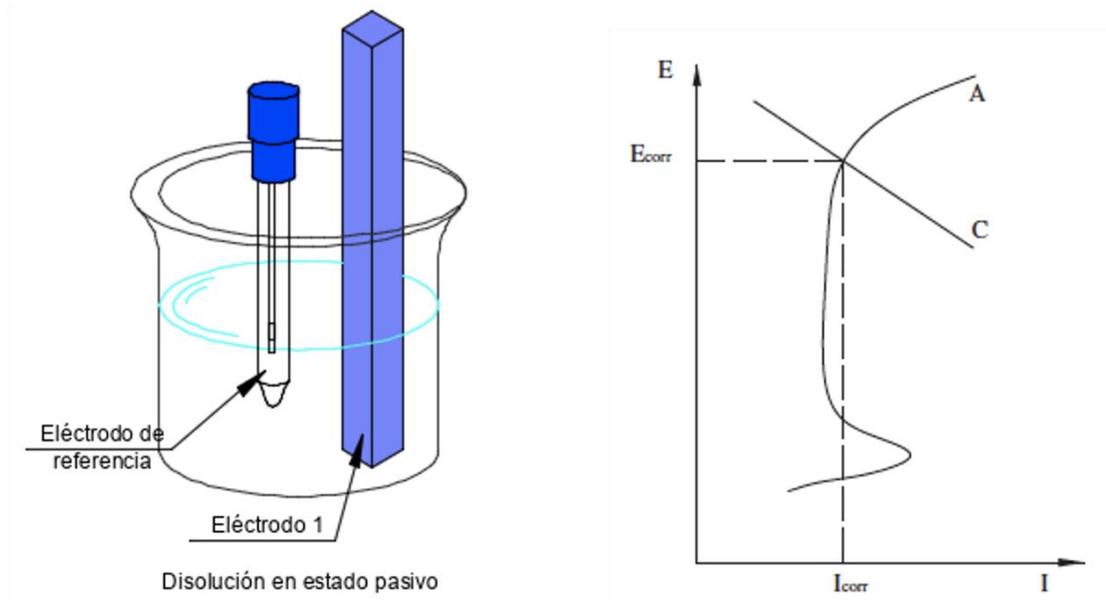


Figura. 2-13. Curvas de polarización del acero en el hormigón en estado pasivo. (Young-Shen, Wen Zhao, Min Zhou, Hui-rong, & Ping, 2013)

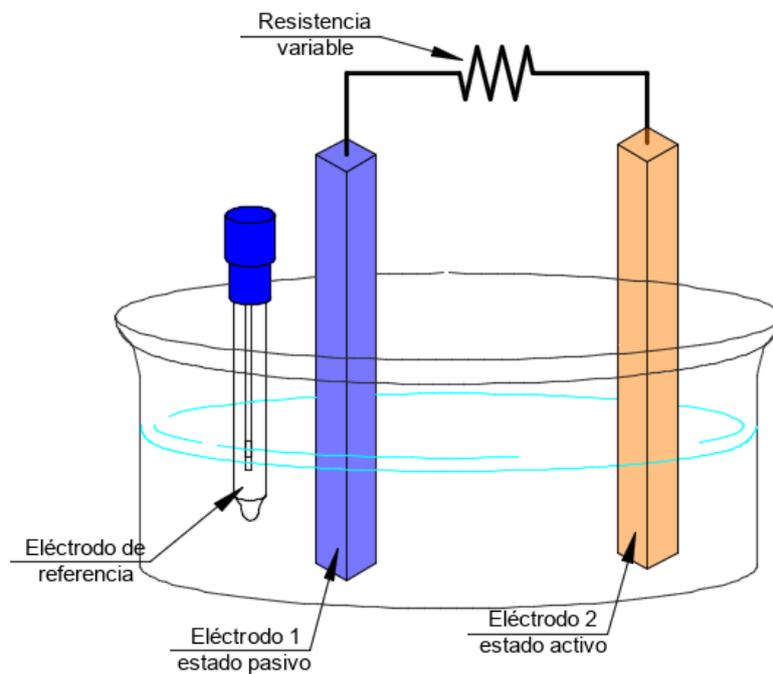


Figura. 2-15. Esquema de pieza de metal en estado pasivo y activo. (fuente propia)

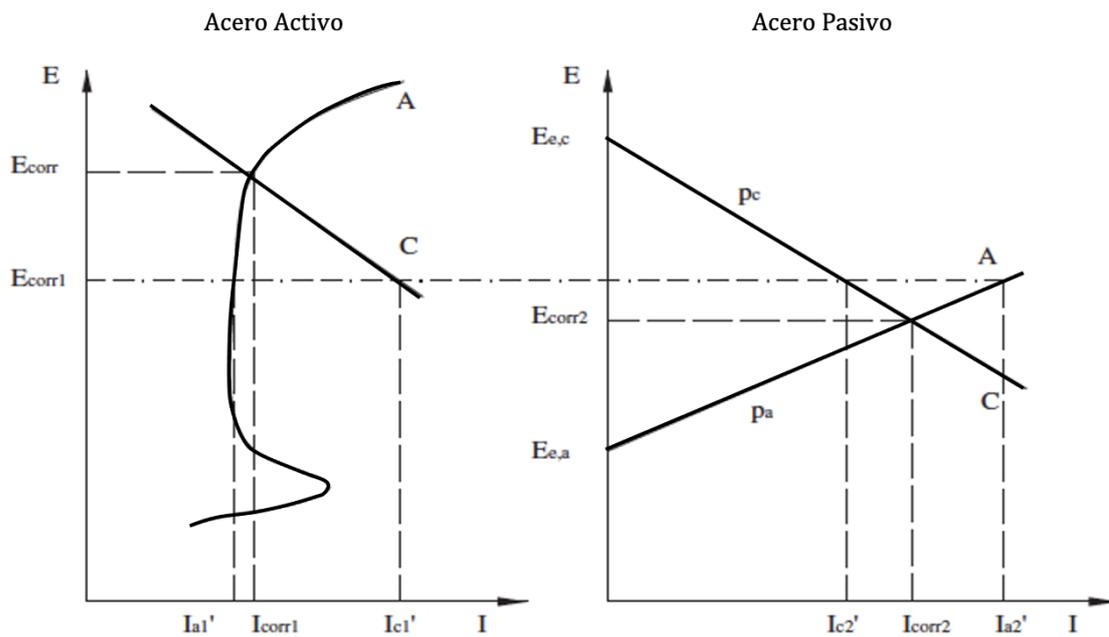


Figura. 2-16. Corrientes de macrocelda entre acero pasivo y activo cuando estos dos están en contacto eléctrico en un electrorolito. (Young-Shen, Wen Zhao, Min Zhou, Hui-rong, & Ping, 2013).

Como se puede apreciar en la figura anterior, ambos electrodos se ven sometidos a una polarización ocasionada por la conexión eléctrica entre ambos. Esto conduce a que los valores de su potencial electroquímico tiendan a igualarse. Sin embargo, estos valores no alcanzan un mismo punto debido a que existe una resistencia entre ambos sistemas. En el caso de estudio de un electrorolito, la resistencia se podría considerar nula, pero para el caso

del hormigón, este material presenta una resistencia óhmica que si que acarrea consecuencias en la intensidad de macrocelda.

Este cambio en los potenciales también conlleva la aparición de una intensidad de macrocelda.

En este caso es la resistencia óhmica la que juega un papel clave en las corrientes de macrocelda. A medida que la resistencia disminuye, la corriente circulante comenzará a aumentar. Sin embargo, en un medio con una alta resistividad, la polarización de cada una de las regiones será baja, y la intensidad de macrocelda obtenida también.

En las armaduras embebidas en el hormigón, los procesos anódicos y catódicos actúan ambos de manera simultánea sobre el mismo electrodo, conformado por toda la armadura, lo que impide que se pueda medir la velocidad de corrosión de macrocelda directamente.

Para poder comprender esto, se debe retomar el ejemplo de la figura 2-13 de los dos electrodos embebidos en una disolución. Cuando se encuentran separados, cada uno de ellos posee una intensidad de corrosión debido al medio en el que se encuentra. Sin embargo, cuando están conectados uno con otro, a parte de esta corrosión producida por el medio, se produce la corrosión originada por la macrocelda. El resultado del comportamiento real del electrodo corresponde al sumatorio de ambas intensidades de corriente, de macrocelda, y la producida localmente.

2-4

$$j_{corr} = j_{macro} + j_{local}$$

En estructuras de hormigón armado, y por encontrarse todas las armaduras unidas, no es posible separar elementos para controlar la corrosión por macrocelda. En los siguientes apartados se indicarán los beneficios de contar con elementos aislados de la armadura para controlar estos fenómenos.

2.3.2.2. Causas de la corrosión por macrocelda

Como se ha visto anteriormente, las corrientes de macrocelda se generan a partir de la existencia de regiones con diferente potencial electroquímico a lo largo de la superficie del metal. Cuando las armaduras se encuentran en su totalidad en estado pasivo, es posible que se generen corrientes de macrocelda, pero de muy baja intensidad, casi despreciable. Sin embargo, cuando parte de las armaduras han quedado despasivadas por alguno de los agentes agresivos explicados previamente, estas corrientes adquieren un carácter mucho más importante.

Las situaciones más comunes que se desarrollan en las estructuras de hormigón armado se producen tras la despasivación parcial del armado por la presencia del ion cloruro, o por la carbonatación de parte de las armaduras. Sin embargo, también es posible encontrar corrientes de macrocelda debidas a la presencia de varios metales con

diferentes potenciales electroquímicos o por aireación diferencial. En los siguientes apartados se definen brevemente estos casos.

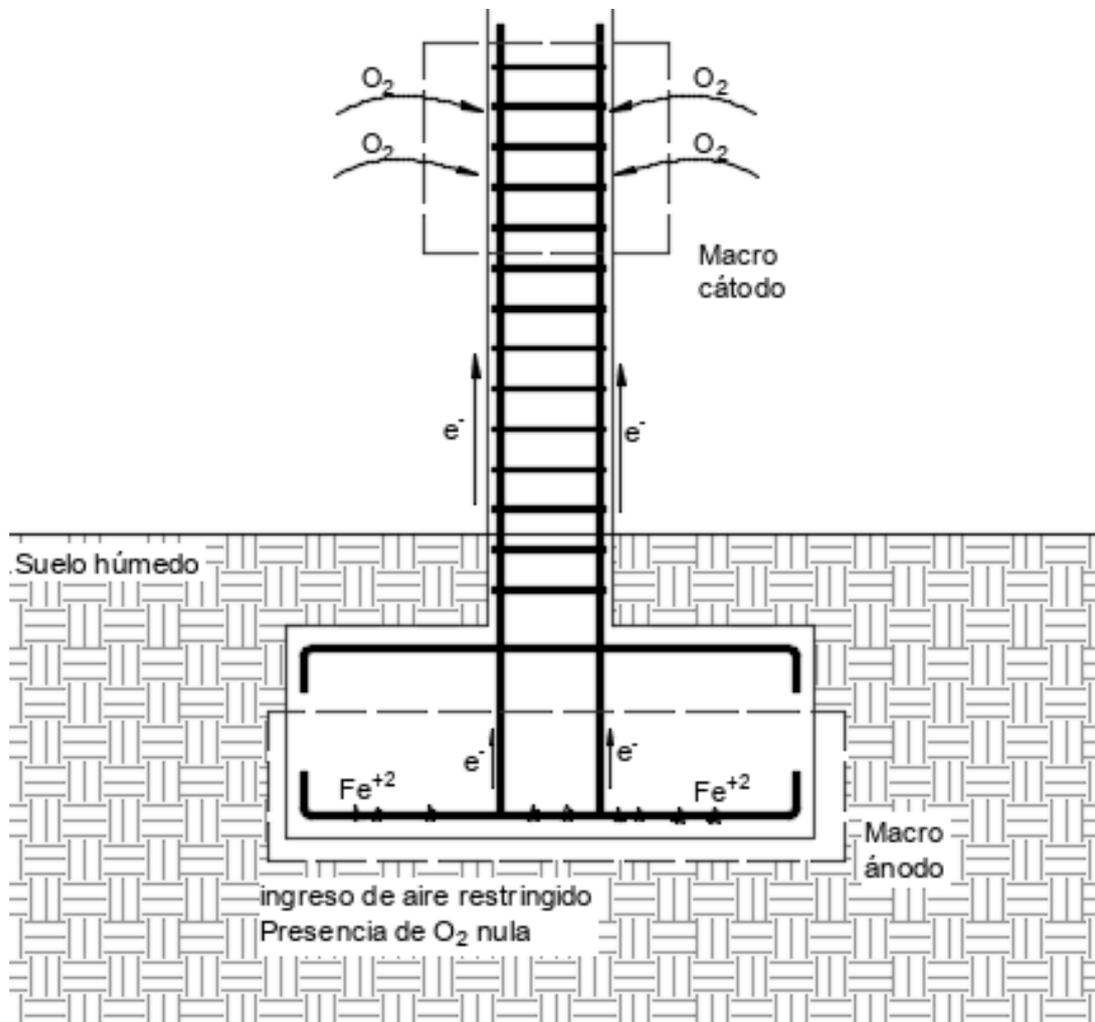


Figura. 2-17. Ejemplo del efecto de macrocelda por aireación diferencial – estructuras enterradas o semienterradas, adaptada de (Bertolini, Elsener, Pedferri, Redaelli, & Polder, 2013)

Contaminación de cloruros:

Muchas de las estructuras de hormigón armado se encuentran cerca de ambientes marinos o sumergidas parcialmente en agua de mar. Debido a esto, las piezas de esta estructura están expuestas al riesgo de sufrir problemas por corrosión a causa del ion cloruro presente en este ambiente. Estos agentes pueden penetrar por la red porosa del hormigón y son capaces de desestabilizar la capa pasiva que protege la armadura puntualmente.

Esta desestabilización de la capa pasiva desencadena el proceso de corrosión por picaduras sobre la superficie del metal. Estas picaduras sobre el metal actúan como ánodos, los cuales comienzan a satisfacer la demanda de electrones producida por las reacciones de reducción en las zonas catódicas.

Estas zonas catódicas están formadas por el entorno de las picaduras y el resto de armadura que cuenta con su capa protectora. Debido a que, en las estructuras de hormigón armado la armadura se encuentra siempre en contacto eléctrico, la formación de zonas anódicas y zonas catódicas acelerará el proceso de corrosión en las picaduras y la favorecerá una mayor estabilización de la capa pasiva en las zonas catódicas.

La corrosión por macrocelda se produce por la presencia de un flujo de corriente entre zonas formadas por ánodos puntuales y un macro cátodo formado por el resto de la armadura en estado pasivo. Ver Figura. 2-18.

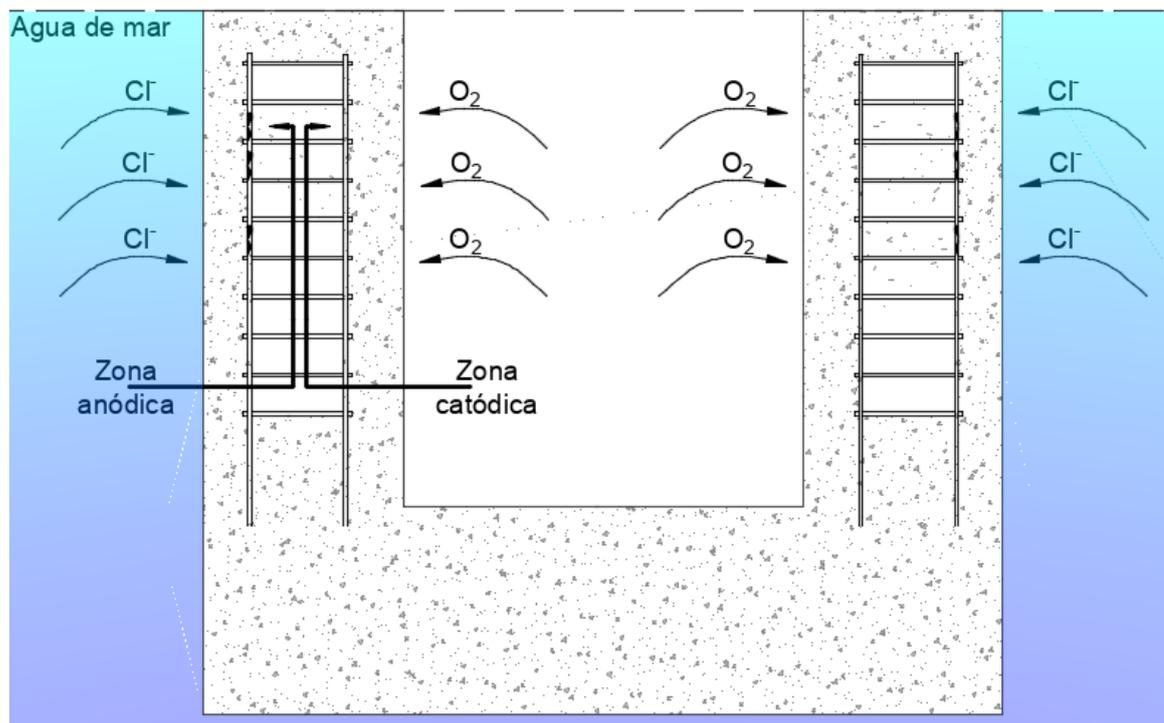


Figura. 2-18. Ejemplo del efecto de macrocelda por ataque de cloruros – estructuras sumergidas, adaptada de (Bertolini, Elsener, Pedferri, Redaelli, & Polder, 2013)

Carbonatación del hormigón:

La carbonatación en el hormigón se produce por el ingreso de dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra presente en el ambiente. Este agente es capaz de penetrar en el hormigón a través de su matriz cementante, y conseguir la disminución de pH del hormigón y así mismo, generar inestabilidad de manera generalizada en la capa protectora de la armadura.

Ya que el frente de carbonatación avanza de manera uniforme, la despasivación se produce generalmente en el armado superficial y más próximo al exterior. Este hecho propicia la aparición de corrientes de macrocelda donde el ánodo es el armado ya despasivado y el resto de las armaduras más protegidas el cátodo.

En algunas ocasiones, las estructuras de hormigón armado, debido a una mala ejecución en el momento de vibrado o compactación del hormigón, se pueden presentar grietas o vacíos en la cara exterior de la estructura.

Lo que significa la reducción de recubrimiento de la armadura en zonas puntuales. Esto es un claro ejemplo de la corrosión de macrocelda por carbonatación, ya que como se menciono anteriormente el CO_2 avanza de manera uniforme sobre la superficie de la estructura, provocando la despasivación de la capa protectora de una de las zonas de la armadura y a su vez el inicio de corrosión. Esta irá propagándose a lo largo del armado de la estructura por el efecto de las corrientes macrocelda. Figura. 2-19

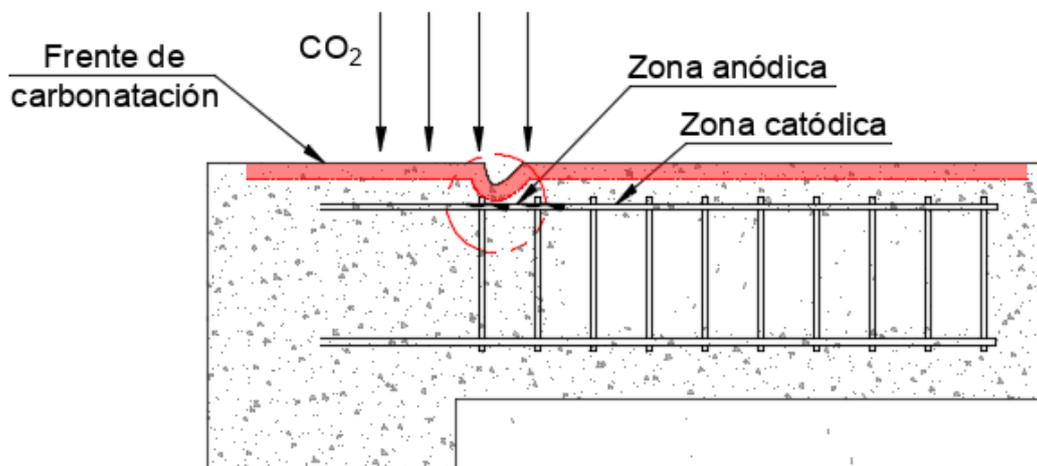


Figura. 2-19. Ejemplo de corrosión por el efecto de macrocelda debido a la carbonatación del hormigón (fuente propia).

Presencia de diferentes metales:

En muchas ocasiones, la dirección facultativa decide emplear diferentes metales en el armado. Esto puede deberse a que, por la agresividad del medio, se decide emplear en algunos puntos otros metales más resistentes, por ejemplo, el acero inoxidable.

Normalmente, no se toma la precaución de aislar eléctricamente estos tramos de armado y toda la armadura se encuentra conectada, tanto el acero al carbono como el acero inoxidable. Mientras el acero al carbono se mantenga en un estado pasivo, las corrientes de macrocelda no presentan un valor significativo. Sin embargo, ante un acero en estado activo, la diferencia de potenciales electroquímicos entre este y el acero inoxidable pueden propiciar el aumento significativo de las corrientes de macrocelda.

Una vez completada esta breve revisión bibliográfica de la corrosión en el hormigón armado, con especial énfasis en las corrientes de macrocelda, en los siguientes apartados se enumeran las principales técnicas de análisis de este fenómeno en las estructuras de este tipo.

2.4. TÉCNICAS DE MEDIDA DE CORROSIÓN

El campo del análisis de la intensidad de corrosión en el hormigón armado abarca numerosas técnicas. Los diferentes autores las han dividido en técnicas cualitativas y cuantitativas. Las primeras permiten conocer el estado en el que se encuentran las armaduras, pero sin aportar un valor numérico. Sin embargo, las técnicas cuantitativas sí que cuantifican el valor numérico de la intensidad de corrosión del elemento analizado. En los siguientes apartados se enumerarán las principales técnicas de cada uno de los grupos.

2.4.1. Métodos cualitativos

Las técnicas de medida cualitativa más importantes son el potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistividad eléctrica (ρ). Se trata de dos métodos, que, combinados, permiten estimar con más fiabilidad la probabilidad que tiene una armadura de sufrir procesos de corrosión

- **Potencial de corrosión (E_{corr}):**

La medida del potencial de corrosión es uno de los principales métodos cualitativos y de gran utilidad, ya que es una técnica que puede realizarse de manera simple “in situ”. La medida de este parámetro permite determinar según unos rangos establecidos por la norma UNE 112083¹⁵, la probabilidad o el riesgo que tiene la armadura de corroerse, ver Figura. 2-21.

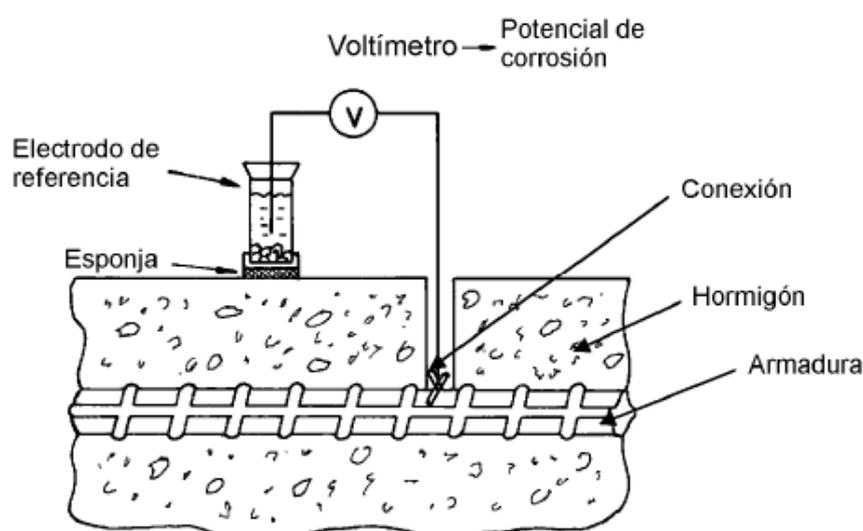


Figura. 2-20. Esquema de medición de potencial de corrosión (E_{corr}) sobre una superficie de hormigón. (UNE 112083, 2010)

¹⁵ UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.

La norma UNE 112083¹⁶ indica el procedimiento para realizar la medida de potencial eléctrico de las armaduras embebidas en el hormigón. La Figura. 2-20, muestra un esquema de dicho procedimiento y los materiales necesarios para poder realizarlo.

Inicialmente, se debe abrir una pequeña cata para descubrir un trozo de armadura y poder generar una conexión eléctrica que luego se conecta el polo positivo (+) del voltímetro, mientras que al polo negativo (-) se conecta el electrodo de referencia; para que la medida sea confiable. Se debe asegurar un buen contacto eléctrico entre la referencia y la superficie del hormigón con la humectación superficial de la pieza y el uso de una esponja humedecida previamente.

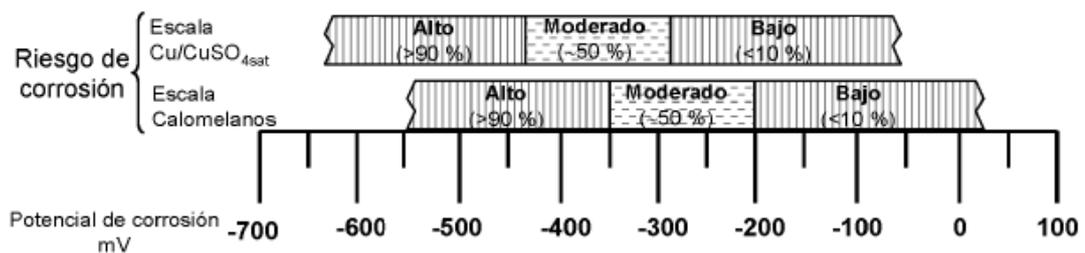


Figura. 2-21. Probabilidad o riesgo de corrosión activa. (UNE 112083, 2010).

La medida de potencial no se debe realizar en un único punto, sino que se debe recoger el valor en diferentes zonas para así tener un barrido general del elemento de estudio. Es de gran utilidad representar estos resultados obtenidos por medio de un mapa de potenciales, ya que esto facilita su interpretación y permite la localización de las zonas con mayor riesgo de corrosión en la estructura. ver Figura. 2-22.

¹⁶ UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.

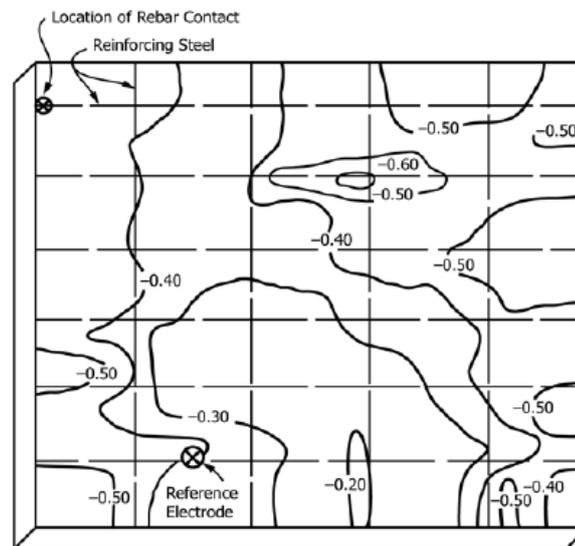


Figura. 2-22. Ejemplo de mapeo de potenciales de corrosión. (Ramón Zamora, 2018).

Este método por sí solo únicamente aporta un grado de riesgo de que la armadura se encuentre bajo condiciones o efectos de la corrosión. Sin embargo, no se debe considerar esta técnica por sí sola como aclaratoria del estado de la estructura, sino que se debe apoyar en otros métodos de análisis, como el caso del estudio de la resistividad eléctrica.

- **Resistividad Eléctrica (ρ):**

El análisis de la resistividad eléctrica es un método de medida que se utiliza para conocer la resistencia óhmica del hormigón endurecido, ya que esta influye directamente sobre la velocidad de corrosión. Para obtener la resistividad eléctrica del hormigón existen dos métodos: uno en probetas de hormigón basada en la norma UNE 83988-1¹⁷, que describe el procedimiento del método directo, y otro para medir la resistividad en estructuras “in situ” basada en la norma UNE 83988-2¹⁸, que describe el procedimiento del método de las cuatro puntas.

El método directo consiste en la aplicación de un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta de hormigón. Estas probetas es necesario acondicionarlas ya que deben estar completamente saturadas de agua, lo que facilita la interpretación de sus resultados. Esta técnica, debido a su procedimiento, queda limitada a trabajos en laboratorio y ha sido la utilizada en diferentes ensayos realizados durante este trabajo.

¹⁷ UNE 83988-1. (2008). *Determinación de la resistividad eléctrica, método directo*, AENOR.

¹⁸ UNE 83988-2. (2014). *Determinación de la resistividad eléctrica, método de las cuatro puntas*. AENOR.

La Figura. 2-23, muestra un esquema de la manera de realizar este ensayo y además los elementos necesarios para poder medir la resistividad eléctrica de manera precisa. Se puede observar que para que exista un buen contacto entre los electrodos y el hormigón, se utiliza una esponja húmeda que abarque el área completa de la probeta y el electrodo.

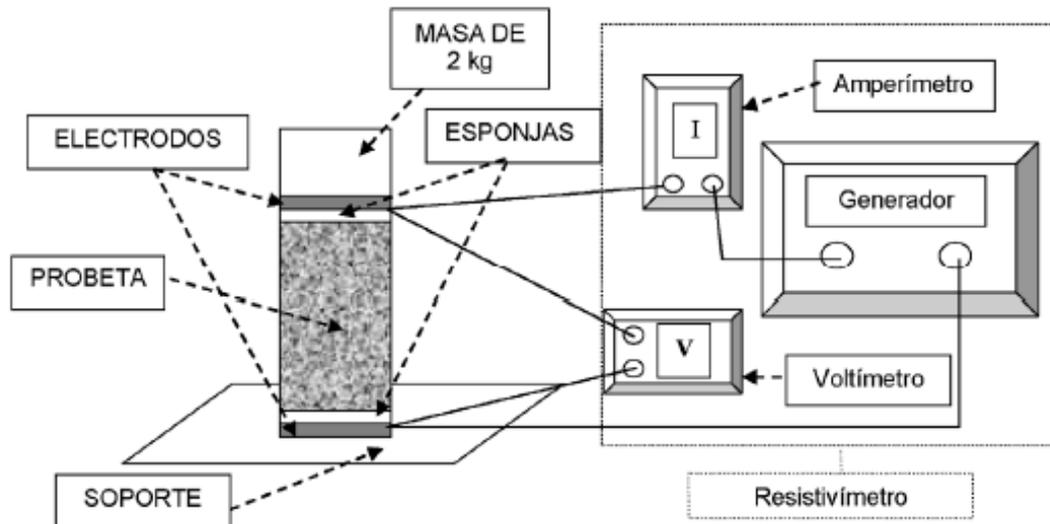


Figura. 2-23. Esquema de medida de resistividad eléctrica por el método directo. (UNE 83988-1, 2008)

2.4.2. Métodos cuantitativos

Debido a la limitación que tienen las técnicas mencionadas anteriormente por su carácter cualitativo, y la necesidad de obtener valores numéricos reales del proceso de corrosión en el hormigón armado, desde hace varios años se han desarrollado diferentes técnicas de medida cuantitativas. Estos métodos son técnicas electroquímicas que consisten en aplicar una perturbación al sistema que lo desplace de su situación de equilibrio, con el fin de estudiar la respuesta obtenida de dicha perturbación.¹⁹

Gracias al desarrollo de estas técnicas es posible cuantificar la corrosión, ya que permiten obtener parámetros como la intensidad de corrosión i_{corr} y la velocidad de corrosión V_{corr} . Para esto es necesario contar con los siguientes elementos que configuran la celda de medida:

- **Electrodo de trabajo (ET):** Es el cual se quiere analizar, en este caso, una armadura embebida, con una superficie de trabajo conocida.
- **Electrodo de referencia (ER):** Cuyo potencial es inalterable y conocido. Este permite controlar el potencial del ET.

¹⁹ Gandia Romero, J. M. (2014). *Tesis doctoral, Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

- **Contraelectrodo (CE):** Electrodo de un material conductor cuyo potencial electroquímico es invariable durante la medida. Como se muestra en la siguiente figura, el electrodo si se mide sobre elementos aislados, puede estar conformado por el resto de la armadura. Este conjunto tiene una superficie infinitamente más grande que el electrodo de trabajo o sensor de medida.
- **Electrolito:** En el caso de las medidas en estructuras de hormigón armado, es la disolución del poro de hormigón en el cual está embebido el ET.
- **Equipo de medida:** Necesario para aplicar la señal eléctrica que altere el equilibrio del sistema y registrar la señal eléctrica de respuesta.

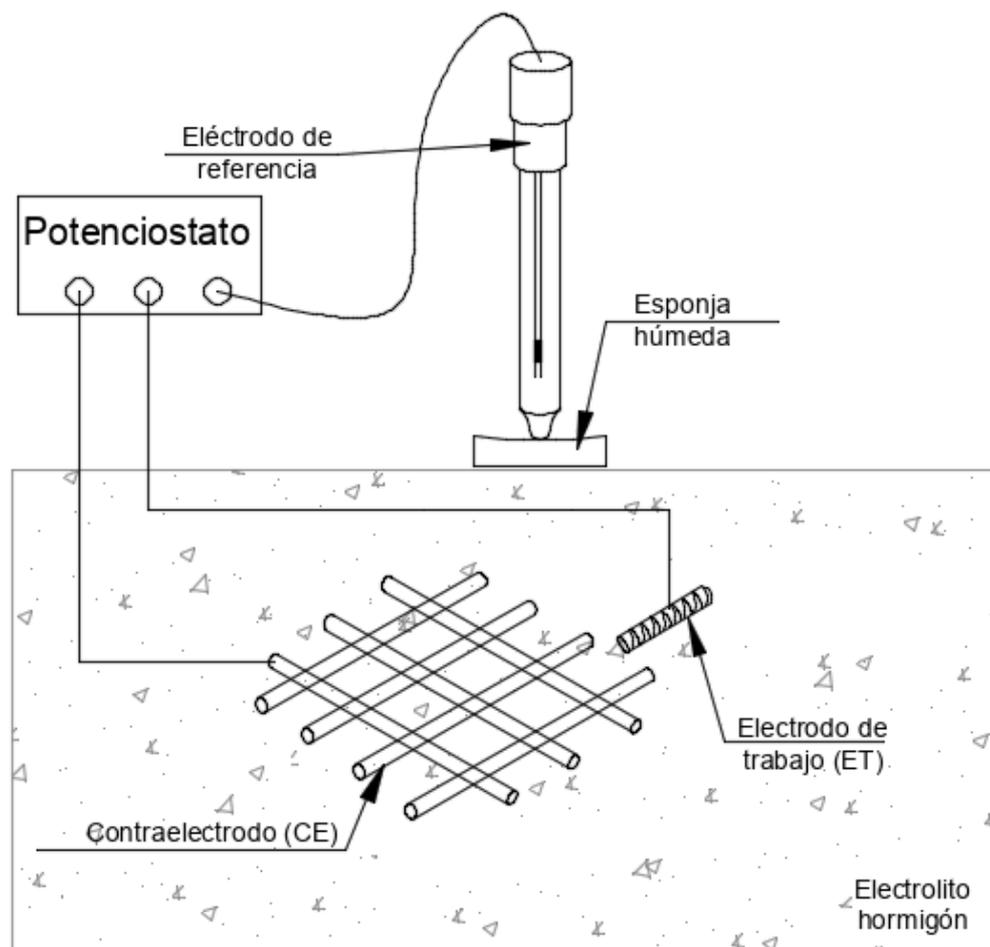


Figura. 2-24. Esquema de celda de medida de la velocidad de corrosión. Esquema adaptado de (Ramón Zamora, 2018).

Para poder medir un electrodo embebido en hormigón se debe aplicar una perturbación. Esta perturbación, también denominada polarización, lo aleja del estado de equilibrio y produce una respuesta medible. Esta respuesta, se recoge en forma gráfica con curvas de potencial-corriente frente al tiempo.

Con el análisis de las curvas de polarización, se obtiene como resultado la intensidad de corrosión (i_{corr}) del ET, que viene dada normalmente en (μA). A partir de la cual se puede obtener la densidad de corrosión (j_{corr}), que resulta de dividir la intensidad de corrosión en la superficie del electrodo de trabajo (ET), por lo cual sus unidades se expresan en ($\mu A/cm^2$). Obtenida la densidad de corrosión se puede determinar la velocidad de corrosión (V_{corr}) según la ecuación (2-5) dada por la norma ASTM G102.²⁰

2-5

$$V_{corr}(\mu m \cdot \text{año}^{-1}) = 3,27 \cdot \frac{j_{corr}(\mu A \cdot cm^{-2}) \cdot M}{\rho \cdot n}$$

- La velocidad de corrosión (V_{corr}), representa la pérdida de volumen por unidad de superficie del acero y unidad de tiempo.
- Masa atómica del metal en g/mol: M (g/mol)
- Densidad del metal en g/cm³: ρ (g/cm³)
- Número de electrones que participan en la reacción: n (2 para el caso del hierro [Fe]).

Tabla 2-1. Valores límite de densidad y velocidad de corrosión según UNE 112072.²¹

Densidad de corrosión J_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Velocidad de corrosión J_{corr} ($\mu m/año$)	Nivel de corrosión
<0,1	<1,16	Despreciable
0,1 a 0,5	1,16 a 5,8	Bajo
0,5 a 1	5,8 a 11,6	Moderado
>1	>11,6	Elevado

- **Método de extrapolación de Tafel:**

El método de extrapolación de Tafel está basado en la representación gráfica del logaritmo del valor absoluto de la corriente anódica y catódica del electrodo, en función de un sobrepotencial aplicado (η). Llevar a cabo o realizar esta técnica necesita de unos barridos de potencial amplios a muy baja velocidad, por lo que la muestra se polariza de manera significativa, lo cual puede llegar a provocar daños irreversibles en el electrodo a nivel electroquímico. Sin embargo, esta técnica es usualmente usada en el campo del hormigón armado como un referente para la estimación de datos en laboratorio.

²⁰ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 1, sección 1.3.2.2 "Determinación de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas", páginas 59-63.

²¹ UNE 112072. (2011). *Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*. AENOR.

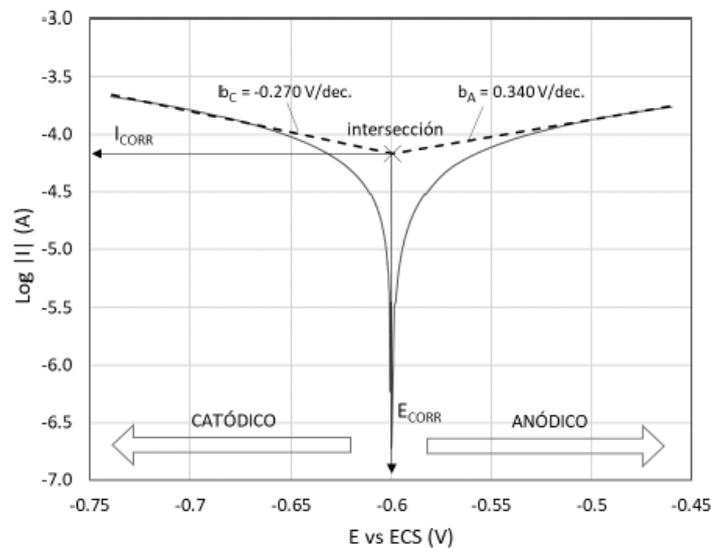


Figura. 2-25. Diagrama del método de extrapolación de Tafel. (Ramón Zamora, 2018)

La Figura. 2-25, muestra el diagrama de las curvas de polarización para una muestra de metal. Este diagrama representa el valor de sobrepotencial (η) en las abscisas y el logaritmo del valor absoluto de la corriente en sus ordenadas. Este método se basa en la existencia de regiones lineales tanto en la curva anódica como catódica a partir de un sobrepotencial elevado (muchos autores asumen que este sobrepotencial se sitúa en torno a 60V). El método de la extrapolación de Tafel permite determinar la intensidad de corriente (i_{corr}), con la prolongación de las rectas de la zona anódica y catódica hasta su intersección, situada en el entorno del potencial de corrosión, tal y como se observa en la figura anterior.

Un inconveniente que tiene aplicar este método en el acero embebido en el hormigón es el polarizar la muestra con barridos de potenciales amplios y a baja velocidad, ya que el tiempo de recuperación de estabilidad de la muestra es aproximadamente de 3 días²²

- **Método de Resistencia a la Polarización:**

A partir de este método y la necesidad resolver el problema de no polarizar la muestra con los barridos de potenciales amplios, se han desarrollado técnicas alternativas. Uno de los que más éxito ha conseguido y actualmente es uno de los más empleados para las medidas in situ la Técnica de la Resistencia a la Polarización (R_p), que se caracteriza por su sencillez al obtener los valores de i_{corr} , a partir de la ecuación de Stern y Geary:

²² Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 1, sección 1.3.2.2 "Determinación de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas", páginas 65-68.

2-6

$$j_{corr} = \frac{B}{R_p A}$$

Donde A, es el área de superficie del metal empleado y B la constante de Stern y Geary, que se determina con la siguiente ecuación:

2-7

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

Donde b_A y b_C , son los coeficientes anódico y catódico de Tafel, valores calculados cuya unidad es voltios por década de intensidad de corriente.

El parámetro B generalmente se sitúa en los 13 y 52 mV, según sea activa o pasiva respectivamente la zona a estudiar. En caso de no conocer el estado del sistema, se opta por utilizar un valor medio de 26 mV, lo que da un error aproximado de 2 en la determinación del i_{corr} . Error que es aceptable para medidas en campo²³.

Este método de la resistencia a la polarización lineal sirve para determinar los valores de R_p , que permite estimar el valor de la velocidad de corrosión de un metal de una forma rápida. Esta técnica consiste en la aplicación de un barrido pequeño de potencial a una velocidad baja. El rango está entre ± 10 mV y ± 30 mV, con respecto al E_{corr} .

A partir de la pendiente del tramo lineal de la curva de polarización es posible obtener el valor de la resistencia a la polarización (R_p).

Randles en 1947²⁴, propone un circuito formado por dos resistencias, que representan la resistencia a la polarización (R_p) y la resistencia eléctrica del sistema (R_s), además de esto un condensador que representa la capacidad interfacial entre metal/electrolito (C_{dl}). Sin embargo, diferentes investigadores mediante estudios con otros circuitos concluyeron que el cálculo realizado con esta técnica no calcula el valor real de R_p sino que es una aproximación, denominada R_a (Resistencia Aparente), y corresponde a la suma de R_p y R_s (resistencia óhmica del hormigón), la cual debe calcularse con otras técnicas.

²³ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Capítulo 1, sección 1.3.2.2 "Determinación de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas", página 71

²⁴ Randles, J. (1947). Kinetics of rapid electrode reactions, Discuss. Faraday Soc. Vol 1 pp 11-19

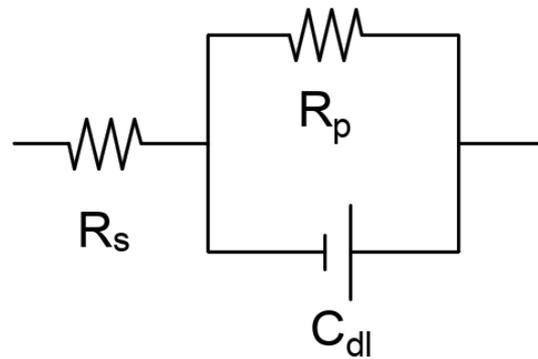


Figura. 2-26. Circuito eléctrico propuesto por Randles para modelizar la interfaz acero-hormigón. Adaptada de (Randles, 1947)

Por tanto, a pesar de que este método cosechó un enorme éxito, cuenta con algunas limitaciones para la toma de medidas en campo, ya que es necesario un ensayo aparte para determinar la resistencia eléctrica del sistema (R_s), para poder compensar la caída óhmica como se comentaba anteriormente.

De este modo, en los años posteriores han surgido diferentes métodos alternativos a este para obtener el valor de la resistencia a la polarización (R_p), que se basan determinar la constante de tiempo ($R_p C_{dl}$) con las curvas de relajación de potencial (η vs t). Esto se logra mediante la aplicación de pequeños escalones, ya sea de corriente (galvanostáticos), cargas (coulostáticos) o de potencial (potenciostático).

La aplicación de **pulsos potenciostáticos**, tiene la ventaja, además, de ser rápido, sencillo y poder compensar la caída óhmica de R_s , y de este modo controlar el grado de polarización que se le aplica a la muestra.

Derivado de este y tomando como base el método citado anteriormente denominado Extrapolación de Tafel, ha surgido el método de Aceleración de la Extrapolación de Tafel (ATE).

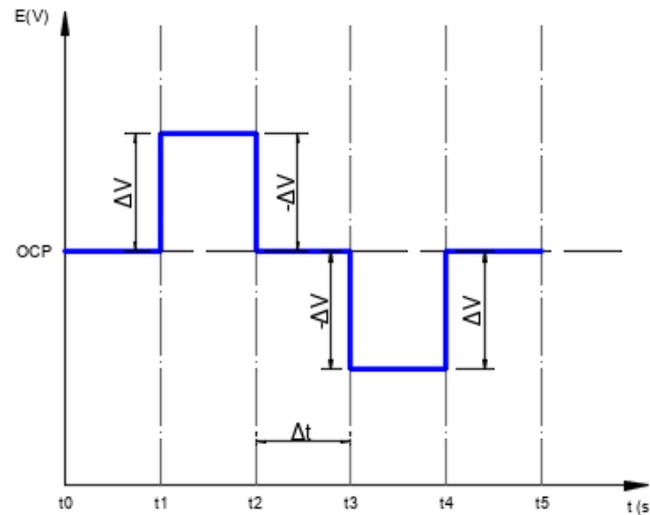


Figura. 2-27. Secuencia básica de escalones de potencial. Adaptada de (Ramón Zamora, 2018)

- **El método de acelerar la extrapolación de Tafel (ATE)²⁵.**

Este método, desarrollado por investigadores del laboratorio de electroquímica de la Universidad Politécnica de Valencia, está basado en el método de la extrapolación de Tafel, ya que también se emplea el análisis de estas curvas para localizar la intersección de las rectas anódica y catódica.

El método de extrapolación de Tafel consiste en conseguir las curvas de polarización ($\log |I|$ vs η) con un potencial lo suficientemente alto hasta alcanzar los tramos rectos tanto de la zona anódica como la de la zona catódica. Al extrapolar estas rectas hasta $\eta = 0$, es decir con E_{corr} se obtiene la intensidad de corrosión (i_{corr}), que a su vez dividido por la superficie del electrodo se puede determinar j_{corr} .

El método ATE, cuenta con la ventaja de no requerir el voltograma completo, lo que evita la polarización de las muestras. Basta únicamente con la obtención de tres puntos de cada una de las pendientes para conseguir trazar las rectas (pendientes de Tafel). Estos puntos se consiguen perturbando el sistema por la secuencia de pulsos potencioestáticos presentada anteriormente y determinar así mismo E_{corr} e i_{corr} junto con los parámetros de corrosión R_p , R_s , C_{dl} .

²⁵ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València. Cap 3 pp 227-261

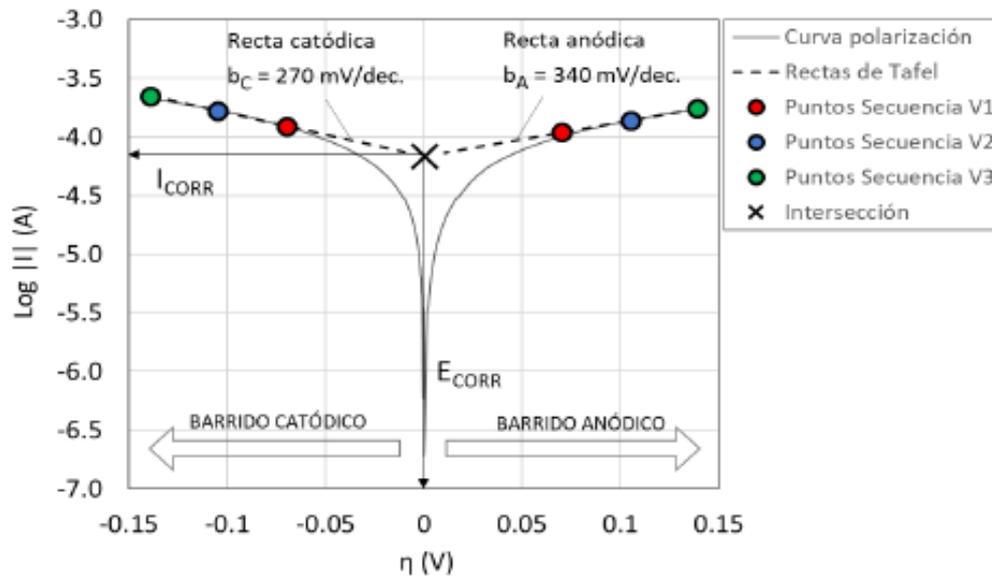


Figura. 2-28. Curvas de polarización método de Tafel - representación de los puntos a determinar en el método ATE. (Ramón Zamora, 2018)

La Figura. 2-28, muestra un ejemplo de las curvas de polarización del método de extrapolación de Tafel y también los puntos que se proponen en el nuevo método ATE, para conseguir las rectas anódica y catódica. La intersección entre ambas rectas permite determinar el valor de i_{corr} y las pendientes b_C y b_A permiten determinar el valor de la constante de Stern y Geary de acuerdo con la ecuación 2-8.

2-8

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

El método ATE (Accelerated Tafel Extrapolation), busca conseguir las rectas de las curvas de polarización de Tafel, pero en este caso, sin ocasionar daños a la muestra.

Esta metodología de trabajo se consigue gracias a la obtención de los puntos mediante pulsos potencioestáticos. Estos pulsos consisten en la aplicación al sistema de una serie de 3 escalones de potencial para cada una de las ramas.

Una vez aplicada la secuencia de pulsos, el aparato de medida recopila la respuesta de la intensidad. El análisis de esta respuesta eléctrica de los pulsos aplicados se realiza mediante la curva de intensidad - tiempo. El ajuste de estos datos se consigue utilizando las ecuaciones teóricas validadas para un circuito equivalente mixto (Farádico - no-Farádico)²⁶ (ver Figura. 2-29). A partir de las ecuaciones y el circuito, es posible obtener el valor numérico de cada uno de los parámetros de análisis.

²⁶ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València.

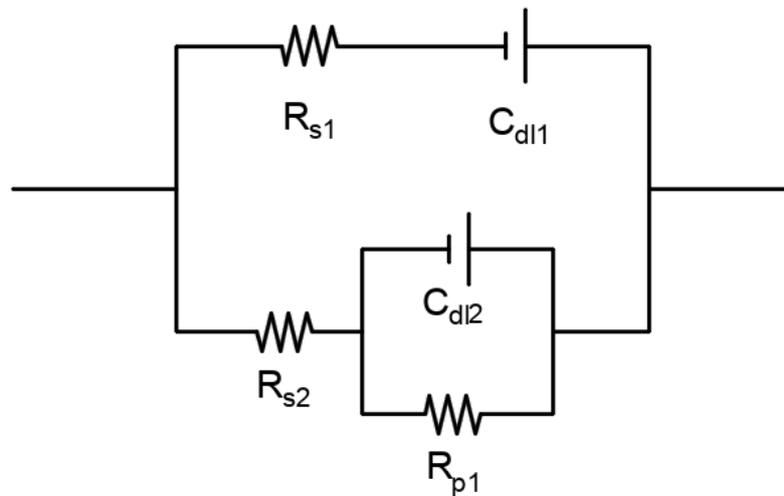


Figura. 2-29. Circuito equivalente mixto, proceso (Farádico - no Farádico) adaptada de. (Ramón Zamora, 2018)

Para la estimación de la intensidad farádica (I_F) obteniendo el valor de (Q_F) de la gráfica carga - tiempo mediante la ecuación 2-9.

2-9

$$I_F = \frac{Q_F}{\Delta t}$$

Pero como se mencionó anteriormente se puede realizar el ajuste de las curvas de un circuito equivalente mixto y obtener los valores de dicho circuito y con estos calcular la I_F mediante la ecuación 2-10.

2-10

$$I_F = \frac{\Delta V}{R_{S2} + R_{P2}} = \frac{\Delta V}{R_T}$$

Siendo ΔV el potencial aplicado en los pulsos y R_T , la resistencia total del sistema que se opone al paso de la corriente.

Para el cálculo del sobrepotencial, es importante mencionar que debe restarse la caída óhmica del sistema que está dada por la multiplicación de I_F por R_s . Esta se puede calcular con la expresión 2-11.

2-11

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

Siendo para esta ecuación R_s , la resistencia eléctrica del hormigón que se determina conociendo los valores del circuito equivalente mixto R_{S1} y R_{S2} .

2-12

$$R_s = \frac{1}{\frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}}}$$

El modelo matemático establecido para el comportamiento de un circuito eléctrico mixto (ver Figura. 2-29), se presenta en la ecuación 2-13²⁷

2-13

$$\begin{aligned} & i_F(\Delta V_j; \eta_j t) + i_{NF}(\Delta V_j; t) \\ &= \frac{\Delta V_j}{R_{s1}} e^{-\frac{t-t_j}{R_{s1} C_{dl1}}} + \frac{\eta_j}{R_{p2} + R_{s2}} - \frac{\Delta V_j}{R_{p2} + R_{s2}} e^{-\frac{(t-t_j) R_{p2} + R_{s2}}{R_{p2} R_{s2} C_{dl2}}} \\ &+ \frac{\Delta V_j}{R_{s2}} e^{-\frac{(t-t_j) R_{p2} + R_{s2}}{R_{p2} R_{s2} C_{dl2}}} \end{aligned}$$

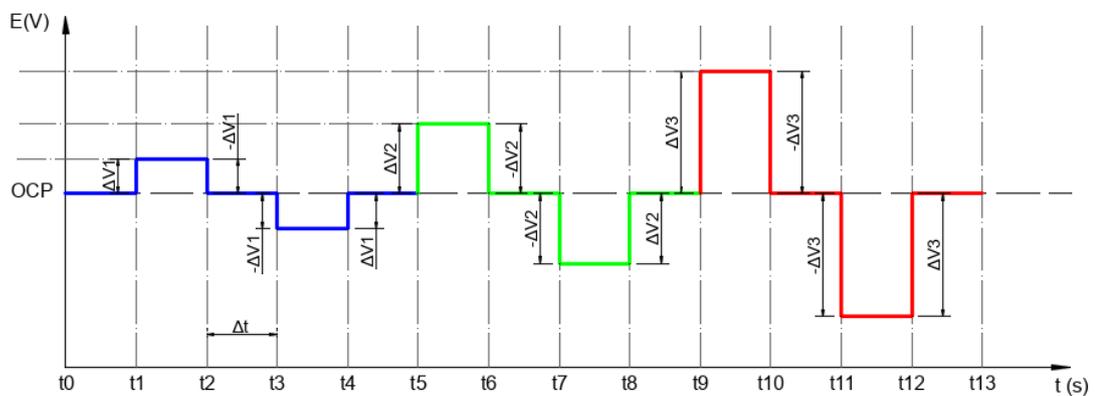


Figura. 2-30. Esquema de secuencia de pulsos potencioestáticos para la aplicación del método ATE. Adaptada de (Ramón Zamora, 2018)

La Figura. 2-30, muestra el ejemplo de un esquema para la aplicación de los pulsos potencioestáticos en secuencia, con las diferentes variaciones necesarias para la obtención de los tres puntos I_F y h , tanto de la zona anódica como de la zona catódica.

El método ATE, permite determinar la velocidad de corrosión de las armaduras con gran fiabilidad utilizando una secuencia de pulsos potencioestáticos de $\pm 70\text{mV}$, $\pm 105\text{mV}$ y $\pm 140\text{mV}$, con una duración de 50 segundos por escalón de pulso. Esto permite calcular los parámetros de corrosión sin llegar a perturbar la armadura como lo hace el método de extrapolación de Tafel.

La amplitud de cada sobrepotencial y la duración de cada pulso potencioestático esta validada por los investigadores que proponen el método. Mediante la ejecución de varios ensayos y pruebas realizadas, se determinó que la aplicación de dichos escalones de pulsos ($\pm 70\text{mV}$, $\pm 105\text{mV}$, $\pm 140\text{mV}$) a una duración de 50 segundos, permiten estimar los parámetros de corrosión con una mayor precisión.

²⁷ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València.

La tesis doctoral, “Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones” del doctor José Enrique Ramón Zamora, en su capítulo 3, sección 3.2. describe el fundamento y validación del método ATE.

2.4.3. Sistema de sensores embebidos en hormigón armado.

En este apartado se describe brevemente la composición y el funcionamiento del sensor propuesto por el Dr. José Enrique Ramón Zamora de la Universitat Politècnica de València en su tesis doctoral “Sistema de sensores embebidos para monitorizar la corrosión en estructuras de hormigón armado”.

La finalidad de este sensor es monitorizar la velocidad de corrosión que pueden sufrir las armaduras en una estructura de hormigón armado. Este sensor puede ser empleado en: nuevas construcciones, en las zonas de la estructura que sean propensas a sufrir el proceso de corrosión, y además en la intervención de estructuras ya existentes, controlando la efectividad de reparaciones. Además, este sistema ha sido empleado en numerosos trabajos de investigación en laboratorio.

La implementación del sensor está dada según la Figura. 2-32, en donde se puede apreciar de manera clara la forma de instalación del sensor y todo el sistema de monitorización. Este sistema está compuesto de los siguientes elementos:

1. Elemento sensor, este actúa como electrodo de trabajo (ET) Está construido del mismo material de la armadura de la estructura, pero tiene una superficie conocida y delimitada. Además, está conectado mediante cableado al armado general y es posible aislarlo durante las medidas.
2. Armado estructural, actúa como contraelectrodo (CE) y referencia (ER).
3. Soporte para fijar el sensor.
4. Conexiones eléctricas para conectar la armadura y el sensor, con el fin de transportar señales a un sistema de monitorización externo.
5. Conexión a la armadura, construido de un material inerte como el acero inoxidable.
6. Conector externo, con el fin de facilitar la conexión de los electrodos internos con el sistema electrónico.
7. Sistema electrónico de análisis de datos.

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster

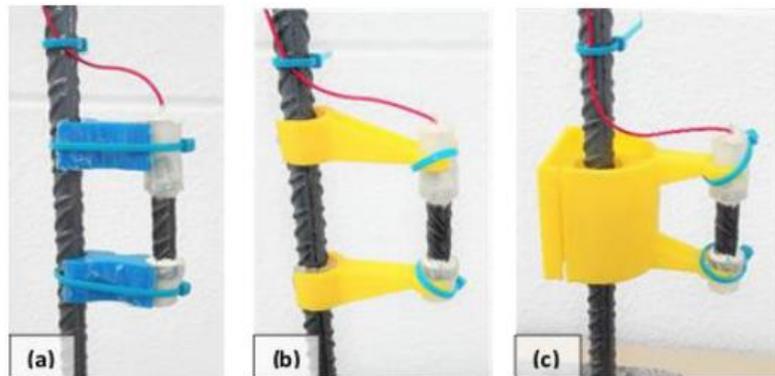


Figura. 2-31. Distintos ejemplos de soporte de sensor a la armadura. (Ramón Zamora, 2018)

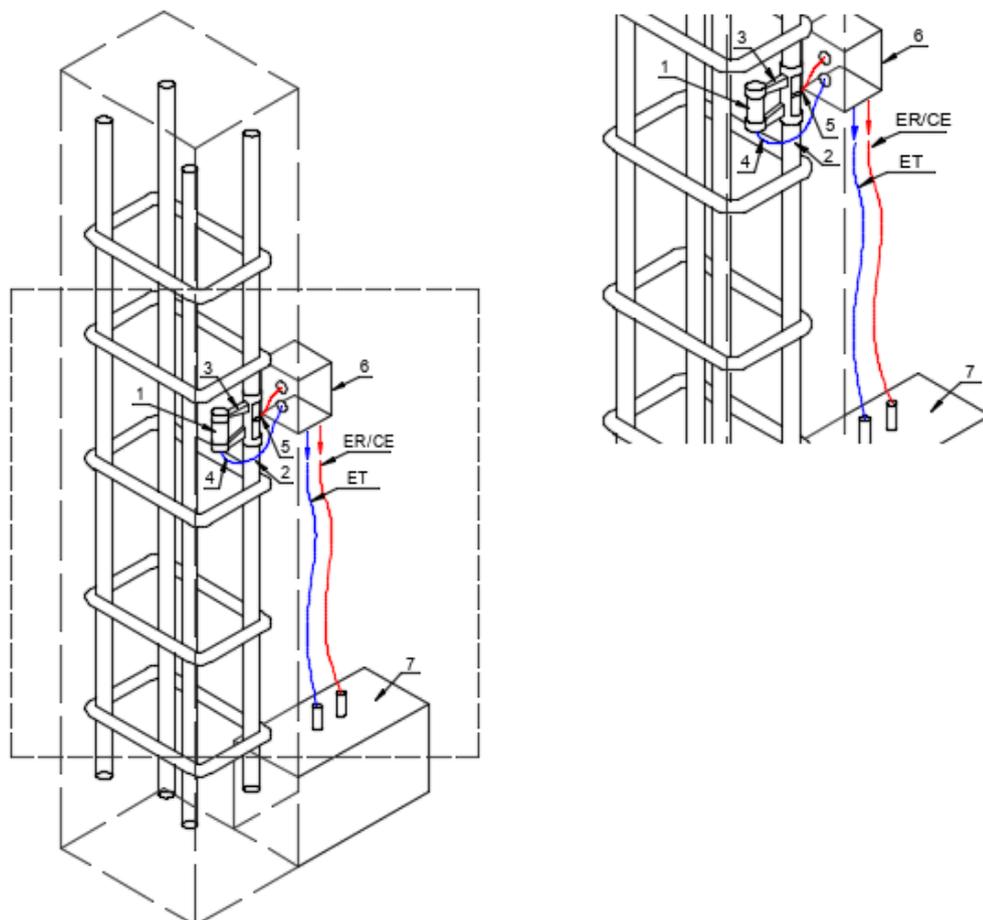


Figura. 2-32. Esquema del sensor de monitorización de la corrosión. Adaptada de (Ramón Zamora, 2018)

El sensor tiene dos estados de funcionamiento, el estado normal y el estado de detención.

El sensor en estado normal o conectado. Este estado de funcionamiento se caracteriza por la conexión eléctrica que existe entre el sensor y la armadura. Dado que el sensor es del mismo material que la armadura y se encuentra bajo las mismas condiciones fisicoquímicas, puede compartir y participar de los mismos procesos que la armadura. Por

tanto, el electrodo de trabajo o sensor planteado está en unos valores de potencial y corrosión similares a la armadura adyacente, y además, participa de los procesos de corrientes de macrocelda entre zonas (i_{macro}).

En el estado de medida o desconectado. En este caso, el sensor se aísla de la armadura, es decir, no hay ningún tipo de conexión eléctrica entre la armadura y el sensor. Este estado de funcionamiento se ejecuta solo durante el proceso de aplicación de pulsos para la medida de la corrosión, ya que es necesario para medir la corriente de corrosión sobre una superficie conocida (superficie de ET). Esto permite determinar la corriente de corrosión de manera local (i_{local}).

Por tanto, durante una situación normal, el sensor está conectado a la armadura, y en caso de haber procesos de macrocelda el sensor participaría de estos. A la hora de analizar el estado del sensor, la primera medida a registrar es la intensidad de corriente entre el sensor y la armadura de la estructura (i_{macro}). A partir de la cual se puede obtener la densidad de corriente de macrocelda (j_{macro}) al normalizar por la superficie del ET. Esta medida puede obtener de manera sencilla utilizando un amperímetro de resistencia nula (ZRA – zero resistance ammeter).

Posteriormente, para la medida de la corrosión local del sensor, el sistema, pasa a estado de medida, donde el método de medida desarrollado trabaja con dos electrodos, el sensor como electrodo de trabajo (ET) y la armadura que actúa como electrodo de referencia (ER) y a la vez como contraelectrodo (CE). Este tipo de medida a dos electrodos también ha sido validado en diferentes trabajos de investigación.²⁸²⁹³⁰

En la Figura. 2-33, se puede observar el sistema de operación del sensor en dos zonas donde existe el proceso de macrocelda.

²⁸ Muñoz Portero, M. J. (2011). Características y usos de los diagramas de Pourbaix. Valencia: Universitat Politècnica de València.

²⁹ Martínez Ibernón, A. (2017). Modelización de procesos de macropar galvánico en estructuras de hormigón armado. Valencia: Universitat politècnica de València.

³⁰ Gandia Romero, J. M. (2014). Tesis doctoral, Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado. Valencia: Universitat Politècnica de València.

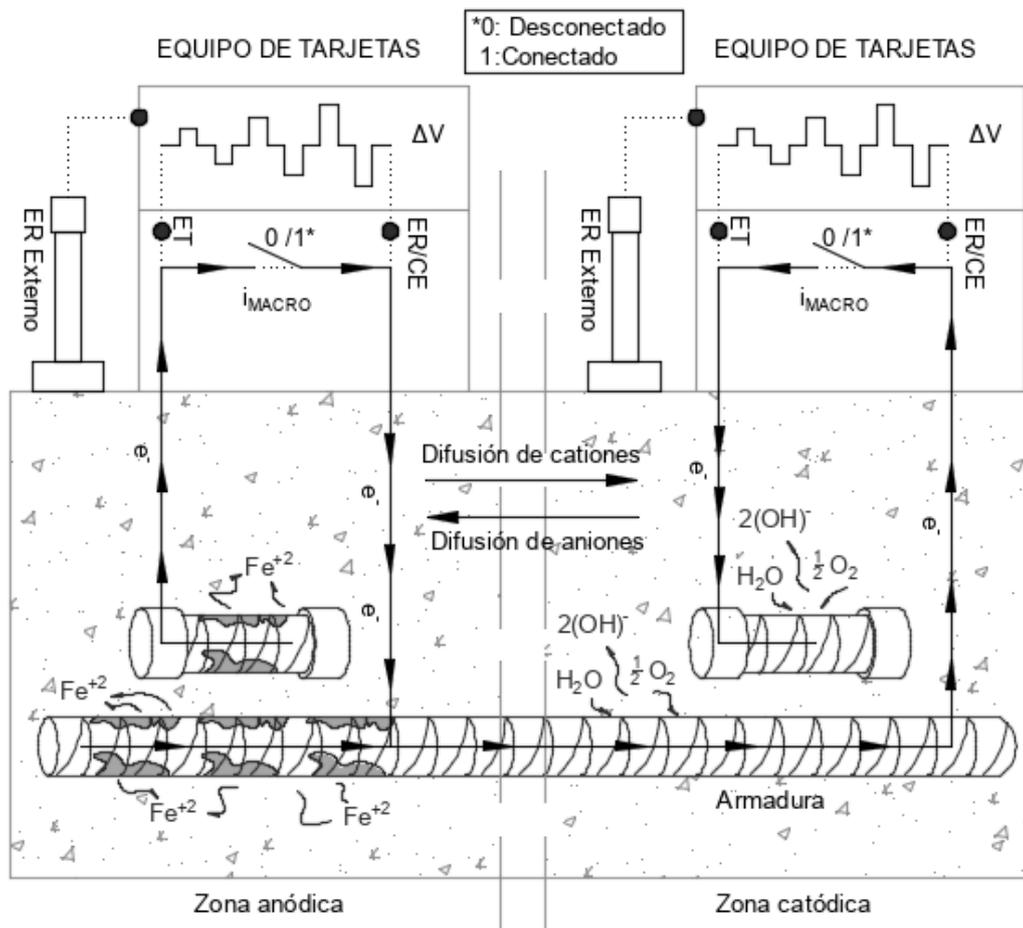


Figura. 2-33. Esquema de operación del sensor embebido en el hormigón armado. (Ramón Zamora, 2018)

Con esta técnica se obtiene el valor de la intensidad de corriente, con la cual se determina la densidad de corriente (j_{local}), valor al cual se le suma la densidad de corriente resultante de la macrocelda (j_{macro}) para obtener la densidad de corrosión total del sistema (j_{corr}).³¹

2-14

$$j_{corr} = j_{macro} + j_{local}$$

Además de esto, el sensor por utilizar el método ATE como técnica de medida, permite determinar los parámetros de corrosión como resistencia óhmica del sistema (R_s), resistencia a la polarización (R_p) y la capacidad de la doble capa (C_{dl}), como se mencionó anteriormente.

El hecho de poseer un sensor que participa de los procesos de macrocelda es una herramienta fundamental, ya que la mayoría de los elementos empleados para la medida de la intensidad de corrosión se componen de elementos aislados y sin relación

³¹ Ramón Zamora, J. E. (2018). Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. Valencia: Universitat Politècnica de València.

electroquímica con la armadura. Además, otra de las ventajas de la herramienta INESSCOM es su posibilidad de automatización. Actualmente este sistema ha sido ya utilizado en numerosos proyectos de monitorización, sin embargo, todavía está en fase de evolución.

Uno de los inconvenientes que presenta es la falta de medida de la intensidad de macrocelda. Este sistema de medida autónomo trabaja con un microordenador que es capaz de aislar el sensor, aplicar la secuencia de medida (pulsos) y recopilar la respuesta. Una vez finalizado el proceso de medida, vuelve a conectar sensor y estructura. Sin embargo y como se enunciaba anteriormente, no es capaz de medir la intensidad de corriente de macrocelda.

En el apartado práctico de este trabajo se tratará de analizar la influencia o error que se comete en la falta de medida de la intensidad de macrocelda. Para ello, y en un elemento estructural a escala se monitorizarán diferentes sensores de manera manual para poder considerar tanto la corrosión local como de macrocelda.

Este trabajo está orientado a la mejora del sistema INESSCOM. De esta forma será posible obtener medidas más fiables y modelos de predicción más precisos.

CAPÍTULO 3. PLAN EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

Tras la revisión bibliográfica referente a la corrosión en el hormigón armado, poniendo especial atención en las corrientes de corrosión generadas por los procesos de macrocelda, en este apartado se plantea una metodología de trabajo que guíe la investigación hasta cumplir con los objetivos propuestos.

Para el estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado, y en especial, en el caso de las corrientes de macrocelda, es importante simular un entorno real. Para ello se ha planteado la construcción de un elemento estructural a escala de hormigón armado, que participe de los procesos de la corrosión generada por las corrientes de macrocelda. Esto se consigue con la despasivación de alguna de las zonas de la estructura, mediante la contaminación con agentes agresivos que cumplan esta función.

3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para lograr alcanzar y cumplir los objetivos propuestos, el proceso experimental se basó en la siguiente metodología de trabajo.

1. Diseño de un elemento estructural a escala de hormigón armado donde se asegure que existirán corrientes de macrocelda
2. Construcción de la estructura de hormigón y fabricación de las probetas necesarias para llevar a cabo los diferentes ensayos de caracterización adecuados.
3. Medidas sobre la estructura fabricada y ensayos sobre las probetas hormigonadas. Estas medidas se dividen en:
 - a) Caracterización del hormigón.
 - b) Localización de armaduras con el “pachometro”.
 - c) Medición de potenciales eléctricos.
 - d) Medición de corriente de la macrocelda a través de un Keithley (ZRA).
 - e) Medición de corrientes de corrosión por medio de la secuencia de pulsos que utiliza el método ATE, desarrollado por investigadores del departamento de construcciones arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Valencia.
4. Recolección y organización de datos.
5. Resultados y análisis de datos
6. Conclusiones extraídas a partir de los resultados obtenidos.

3.3. LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

Para poder conseguir los objetivos definidos al inicio del trabajo, se diseñó y fabricó una losa de hormigón armado, dividida en dos zonas. Por un lado, una dispuesta para ser contaminada por cloruros y que estos aceleren el proceso de corrosión en esta zona, y otra en la que la superficie pasiva de armadura sea capaz de demandar electrones y, por tanto, de propiciar la aparición de fenómenos de macrocelda. La losa de hormigón armado es una estructura a escala reducida de una estructura real. Las dimensiones de dicha losa fueron 80 x 140 x 9 cm (Figura. 3-1).

La contaminación con cloruros en una de sus zonas se realiza con el motivo de conseguir la inestabilidad de la capa pasiva de manera local en las armaduras de dicha área, debido a la conexión eléctrica entre regiones, la zona activa trabaja de manera anódica respecto de la otra zona, que en este caso actúa como zona catódica.

La concentración de cloruros en dicha zona se determina para que sea superior al 0,4% del peso total de cemento, lo que favorecerá y acelerará los procesos de corrosión. De esta forma se consigue generar el proceso de macrocelda en la estructura, y con el fin de determinar las corrientes generadas por este proceso, se dejan embebidos varios sensores para medir mediante técnicas electroquímicas los valores de corrosión.

- **Dimensiones de la losa:** Tendrá un largo de 140 cm, un ancho de 80 cm y una altura de 9 cm.
- **Zonas de la losa:** Una zona de la losa, se contaminará con cloruros para poder generar corrientes de macrocelda entre una zona y otra. Ver Figura. 3-1
- **Disposición del armado,** varía según la zona, la zona contaminada con cloruros (zona anódica), tendrá una separación mayor y menor cantidad de barras a la zona sin contaminar (zona catódica).
- **Disposición de sensores:** Se ubicarán diversos sensores, unos conectados a la armadura y otros desconectados.

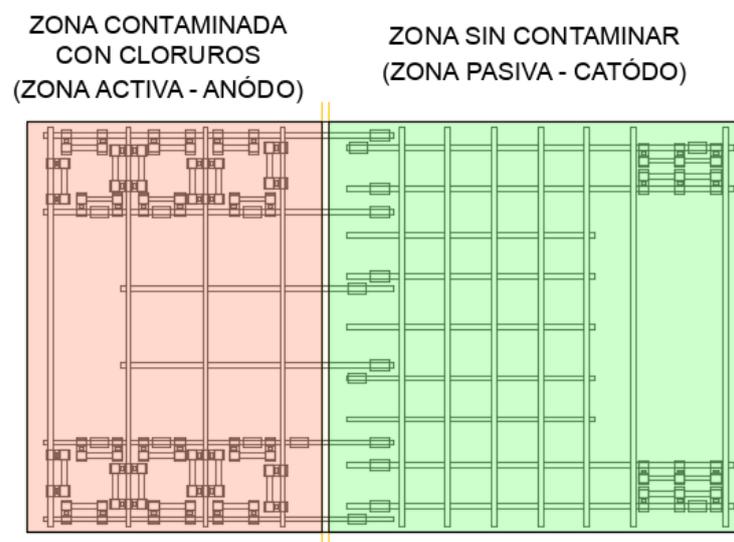


Figura. 3-1. Esquema general estructura de hormigón armado - Losa (fuente propia).

3.3.1. Proceso de construcción

En este apartado se describe el proceso de construcción de la losa desde su etapa inicial de diseño hasta su etapa final de ejecución. Este proceso fue realizado por el equipo de trabajo compuesto por el autor y el cotutor del presente trabajo. Además, se contó con la colaboración de diferentes miembros del departamento de construcciones arquitectónicas, del laboratorio de electroquímica de la ETSIE y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH-UPV).

Este proceso se inició en el mes de febrero del año 2020, con la fabricación y preparación de sensores y barras de la armadura. Este trabajo consistió en la toma de medidas y corte de barras de acero mediante el uso de un esmeril angular (radial). Posteriormente se realizaron las conexiones de los sensores con cable de cobre conductor, la cual se materializó mediante una perforación en uno de los extremos de cada sensor, por medio de un taladro radial.

Dicha adecuación del sensor también contempla la colocación de un fragmento de PVC para cada uno de sus extremos rellenos con resina epoxi y cubiertos con masilla de poliuretano, con el fin de aislar y evitar el contacto eléctrico entre los sensores y la armadura y delimitar el área de trabajo.

Paralelamente, se diseñaron una serie de modelos de soportes en 3D mediante el software AutoCAD, con el fin de fijar los sensores a la armadura. Estos soportes fueron impresos con la ayuda de una impresora 3D, la cual facilitó la fabricación del gran número de soportes empleados. Figura. 3-2

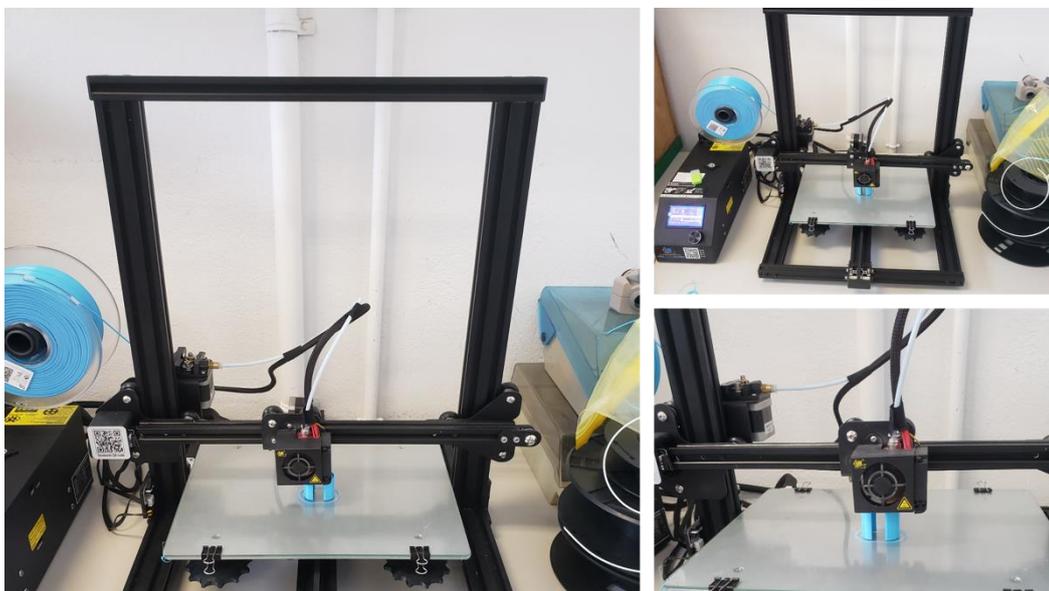


Figura. 3-2. Impresora 3D (fuente propia).

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de hormigonado, el cual se realizó en las instalaciones del instituto ICITECH-UPV, lo que facilitó y agilizó este proceso.

Finalmente, acabada la etapa de hormigonado se transportó la losa de hormigón de aproximadamente 242 kg y las distintas probetas destinadas a los ensayos de caracterización hasta el laboratorio de electroquímica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE).

Materiales

Para la correcta elaboración y construcción de la estructura de esta investigación, se utilizan los siguientes materiales.

- **Armadura y sensores**

Para la armadura de la losa se utilizan barras de acero corrugado B500SD de diámetro 10mm. Estas barras se cortaron con ayuda de una radial, a las medidas necesarias para el armado longitudinal y transversal de la estructura. Esta armadura actuará además como contraelectrodo durante las mediciones de corrosión.

De igual manera, los sensores fueron elaborados del mismo material que las barras del armado de la estructura, para garantizar que las condiciones electroquímicas sean similares y poder realizar el estudio de manera adecuada. Estos elementos conformarían los diferentes electrodos de trabajo.

La longitud de los sensores es de 7cm. La conexión eléctrica se realizó con una perforación en uno de los extremos, para poder acometer la conexión mediante un cable conductor (cobre). Todos los sensores fueron protegidos en ambos extremos con piezas de tubo PVC de 16 mm de diámetro que posteriormente se rellenaron con resina epoxi. Además, los extremos del tubo se protegieron con masilla de poliuretano, lo que permitió aislar eléctricamente los sensores de las barras y delimitar la superficie de trabajo a 5 cm lineales. En las siguientes figuras se muestra parte de la fabricación de los sensores.

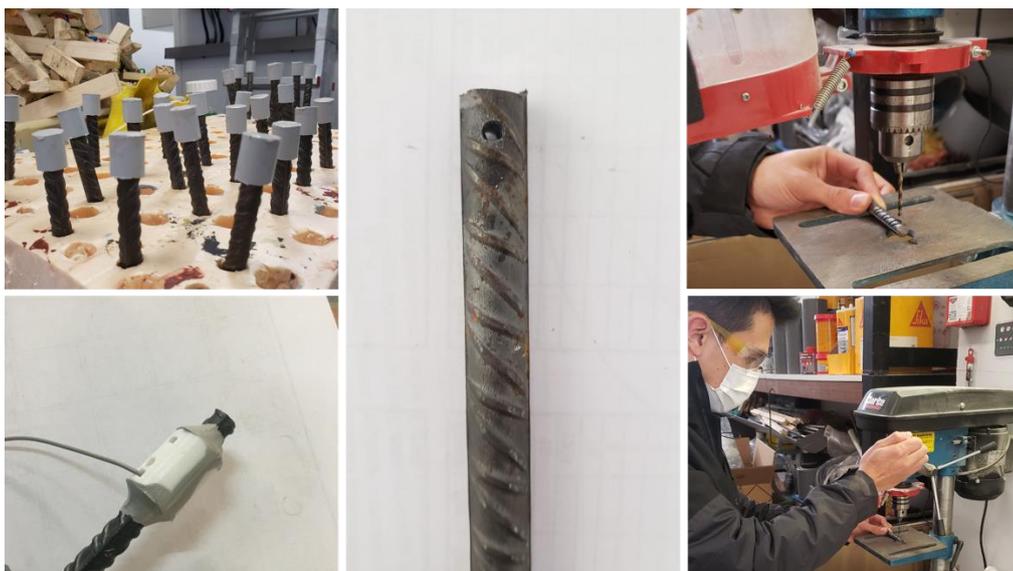


Figura. 3-3. Proceso de elaboración de sensores (Fuente propia)

- **Disposición de la armadura**

La disposición de la armadura de la losa se planteó para que la zona sin contaminar tuviera una mayor superficie de armaduras que la zona contaminada con cloruros, lo que generaría mayor demanda de electrones y favorecería la corrosión en la zona anódica.

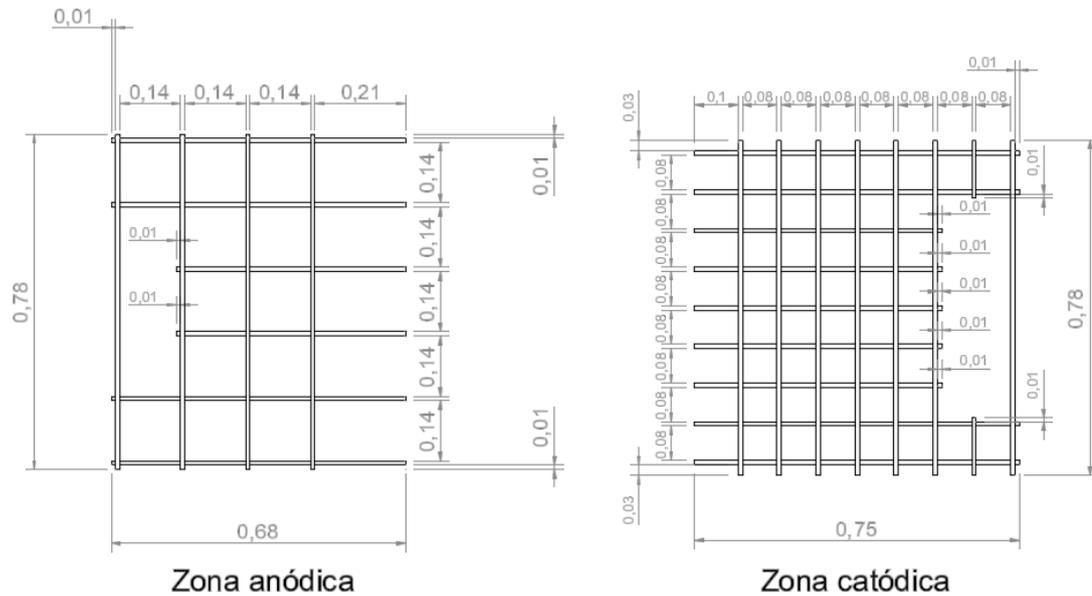


Figura. 3-4. Disposición del armado de la losa (fuente propia).

Para ello se decidió incrementar la cantidad de barras en la zona catódica mediante la reducción del ancho de malla, como se puede ver en la Figura. 3-4.

- **Disposición de los sensores**

Con la finalidad de analizar la influencia de las corrientes de macrocelda en las estructuras de hormigón armado, se embebieron 32 sensores como los descritos anteriormente. Fueron divididos en dos grupos; unos con conexión a la armadura, para que participasen de las corrientes de macrocelda y otros aislados del armado general.

La Figura. 3-5, muestra la ubicación de cada uno de los sensores embebidos en la losa de hormigón, con la distinción por colores de los sensores en estado conectado y desconectado. Todos los sensores se localizaron agrupados y en las zonas laterales de la pieza para permitir acometer otro tipo de mediciones en los vanos centrales de la pieza.

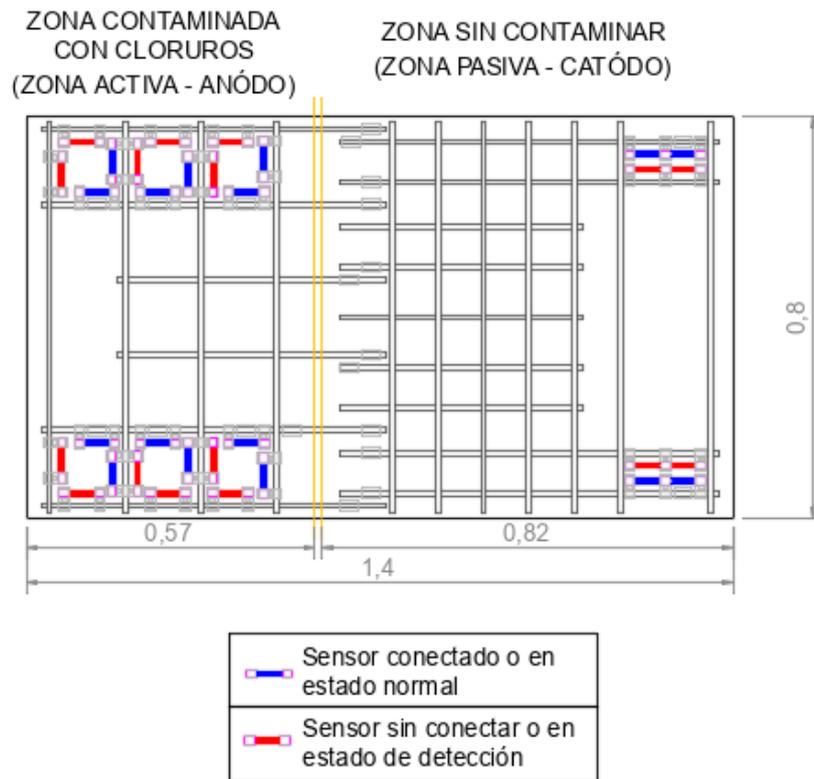


Figura. 3-5. Ubicación de sensores (fuente propia).

La Figura. 3-6, muestra la disposición del armado final junto con la ubicación de los sensores en cada una de las zonas. En estas imágenes se puede apreciar de igual manera el trabajo realizado para el montaje y soporte de sensores con sus respectivas conexiones eléctricas.

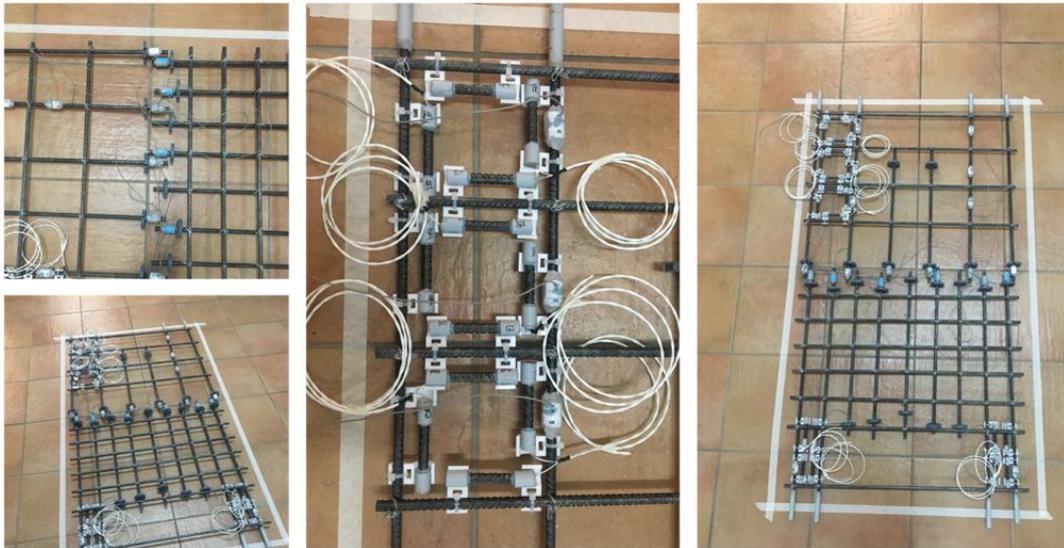


Figura. 3-6. Proceso de armado y ubicación de sensores. (fuente propia).

3.4. HORMIGÓN

3.4.1. Dosificación

Para la fabricación de la losa se utilizó un cemento CEM II/B-L 32,5N, con una relación agua – cemento de 0,65, cuya dosificación está descrita en la siguiente tabla.

Tabla 3-1. Dosificación del hormigón utilizado para un metro cúbico. (fuente propia)

Dosificación Hormigón de trabajo	
Material	
CEM II /B-L 32,5N	301,5 Kg
Agua	195L
a/c	0,65
Superplastificante	1,85 Kg
Grava 4/12	490,78 Kg
Arena 0/4	1438,15 Kg

Se trata de un hormigón convencional aceptado por la normativa, pero que no posee propiedades óptimas para favorecer su durabilidad, lo que lo hace conveniente para la investigación, ya que favorecerá la entrada de agentes agresivos como los cloruros en este caso y permitirá el avance acelerado de los procesos de corrosión en las armaduras embebidas en él.

3.4.2. Hormigonado

La preparación del hormigón se realizó en las instalaciones del ICITECH-UPV, ya que en este centro cuentan con una amasadora de hormigón de 500 litros de capacidad.

El proceso de amasado se dividió en dos fases, la primera de ellas para hormigonar la zona contaminada con cloruros, y la segunda para la zona restante de la losa y las probetas que fueron destinadas a los ensayos de caracterización del hormigón, ver Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Probetas para ensayos de caracterización. (fuente propia)

Ensayo	Dimensión probeta	Cantidad
Resistencia a compresión	Ø10x20 cm	2
Absorción - Porosidad	10x10x5 cm	5
Capilaridad	10x10x5 cm	5
Migración Cl-	Ø10x20 cm	3
Resistividad	4x4x16 cm	2

El primer amasado se utilizó para realizar el hormigonado de la parte contaminada con cloruros. Este amasado requirió de un volumen de 30 litros de hormigón y el segundo grupo de amasado requirió de un volumen de hormigón de 80 litros, que sirvió para la zona restante de la losa y las probetas para los ensayos de caracterización.

El proceso de hormigonado requirió de un gran trabajo en equipo ya que fueron varias horas las que tomó realizar dichas amasadas. Inicialmente se preparó y se dejó a disposición todo el material en el centro del ICITECH-UPV (arena, grava, cemento, agua, aditivos).



Figura. 3-7. Preparación de material para la primera amasada. (fuente propia)

Posteriormente, se preparó la disolución con los iones cloruro con una concentración del 3% del porcentaje de peso del cemento. Este porcentaje es aproximadamente 7 veces superior a lo permitido por la norma (0,4%).

Se finalizó el vertido de la primera amasada con ayuda de un puente grúa, que facilitó el traslado y vertido del hormigón a la zona donde estaba ubicado el encofrado de la losa (Figura. 3-10). Para el hormigonado de la zona contaminada se colocó un para pastas (Figura. 3-8), y se vertió el hormigón.



Figura. 3-8. Encofrado de losa de hormigón, separación de zonas (fuente propia).

El hormigonado de la segunda zona se realizó dos horas después. Para ello se retiró el parapastas y se procedió a verter y vibrar el hormigón en la segunda zona. Tal y como se esperaba, se consiguió generar el contacto entre los dos hormigones de manera natural para permitir transferencia iónica entre la zona contaminada y la zona sin contaminar (Figura. 3-11).

Este misma amasada de hormigón se utilizó para la fabricación de las probetas destinadas a los ensayos de caracterización.

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster



Figura. 3-9. Proceso de dosificación (fuente propia).



Figura. 3-10. Hormigonado zona contaminada Cl- (fuente propia).



Figura. 3-11. Hormigonado segunda etapa sin contaminar. (fuente propia).

Miguel Ángel Blanco Duarte
Trabajo Fin de Máster



Figura. 3-12. Hormigonado probetas de caracterización. (fuente propia).



Figura. 3-13. Estado final de hormigonado (fuente propia).



Figura. 3-14. Losa de hormigón armado (fuente propia).

3.5. TRABAJOS PREVIOS A LAS MEDIDAS DE CORROSIÓN

3.5.1. Acondicionamiento de la losa

Con el fin de favorecer la transferencia iónica a través del hormigón, la losa se humedeció periódicamente y se mantuvo contantemente protegida con una lámina de plástico, para así lograr mantener la humedad sobre la losa el mayor tiempo posible. Este procedimiento se realizó de manera diaria durante el tiempo de estudio (Figura. 3-15).



Figura. 3-15. Humectación de la losa (fuente propia).

3.5.2. Localización de la armadura:

Para poder continuar con el trabajo experimental, se debía conocer la ubicación exacta de las armaduras, para lo cual se usó un “pachometro”. La inspección se realizó por toda la superficie de la losa hasta obtener el armado completo, que se dejó trazado sobre la misma. El procedimiento se puede observar en la Figura. 3-16.



Figura. 3-16. Localización armaduras "Pachometro" (fuente propia)

CAPÍTULO 4. MEDIDAS

Este capítulo presenta las diferentes medidas que se realizaron. En primer lugar, se indican las medidas para caracterizar el material con el que fue ejecutada la losa de hormigón, y por último las medidas que se realizaron sobre dicha losa.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Durante la fase de diseño se establecieron diferentes ensayos de caracterización del hormigón, con el fin de determinar su calidad ya que resulta de gran interés la influencia de las propiedades en el estudio de la corrosión.

Los ensayos que se definieron con esta finalidad fueron: la resistencia a compresión, la determinación de la absorción de agua y la porosidad accesible al agua del hormigón, la absorción por capilaridad, la migración de cloruros y la resistividad eléctrica. Las probetas necesarias para acometer todos estos ensayos se definieron en la fase de diseño y se fabricaron junto con la losa, en la segunda amasada. Estas permanecieron en cámara de curado durante 28 días (Condiciones: 20°C 90% Humedad relativa). En los siguientes apartados quedan detallados los ensayos realizados.

4.1.1. Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a compresión se llevó a cabo según el procedimiento establecido por la norma UNE 12390-3 "Determinación a la resistencia a la compresión de probetas". Para ello, se sometieron las probetas a dicho ensayo a los 28 días de edad en el laboratorio de materiales del departamento de construcciones arquitectónicas de la UPV.

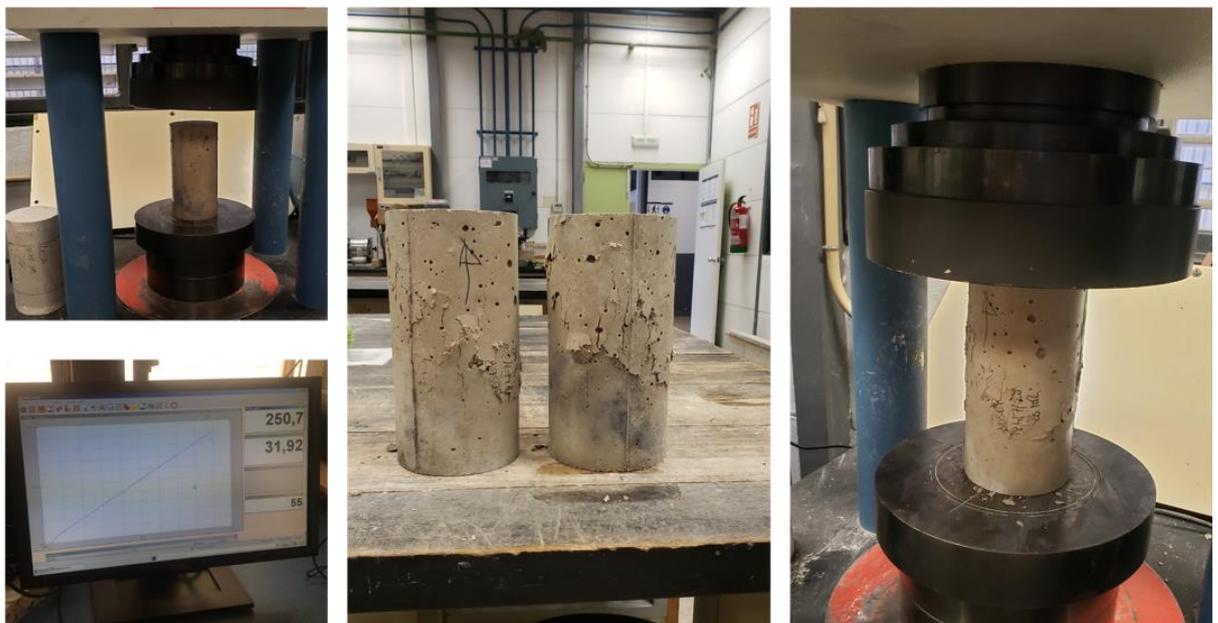


Figura. 4-1. Ensayo de resistencia de compresión (fuente propia).

4.1.2. Absorción – porosidad

El ensayo para el estudio de los coeficientes de absorción y porosidad accesible al agua se acomete mediante el estudio de la variación de peso de diferentes muestras sometidas a dos ciclos de saturación, con base en el procedimiento establecido por la norma UNE 83980 “Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón³²”.

4.1.3. Capilaridad

Para el ensayo de absorción de agua por capilaridad, las probetas se deben acondicionar, inicialmente siguiendo el procedimiento recogido en la norma UNE 83966 “Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad (Figura. 4-2).



Figura. 4-2. Proceso de acondicionamiento de probetas según UNE 83966. (fuente propia).

El método de ensayo para la absorción de agua por capilaridad está establecido por la norma UNE 83982 “Determinación por capilaridad de agua del hormigón endurecido” – método de Fagerlund (Figura. 4-3).

³² UNE 83980. (2014). *Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón*. AENOR.



Figura. 4-3. Absorción de agua por capilaridad norma UNE 83982 (fuente propia).

4.1.4. Migración de cloruros

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros según la norma NT BUIL 492 “Coeficiente de migración de cloruros para experimentos de migración en estado no estacionario”.

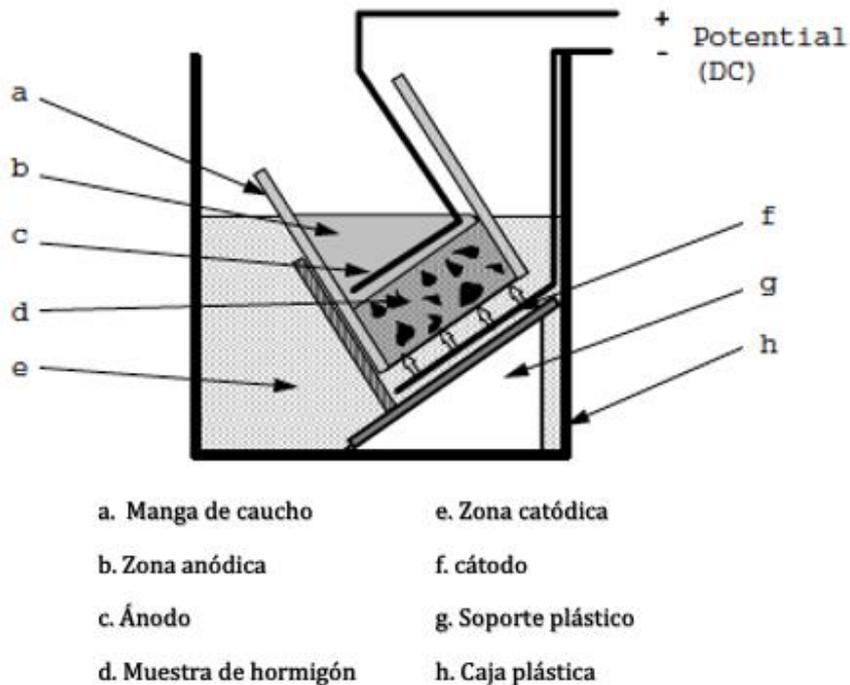


Figura. 4-4. Esquema de ensayo de migración de cloruros adaptada de (NT BUILD 492, 1999)

4.1.5. Resistividad eléctrica

El ensayo se ha realizado según la norma UNE 83988-1 “Determinación de la resistividad eléctrica”, método directo. Como se mencionó en el marco teórico, este método junto con el del potencial eléctrico proporcionan una medida cualitativa de la corrosión, es decir estiman el riesgo o probabilidad de corrosión que tendrá la armadura de la estructura.



Figura. 4-5. Ensayo de resistividad eléctrica según norma UNE 83988-1 método directo (fuente propia)

4.2. ENSAYOS EN LA LOSA

4.2.1. Mapeo de potenciales

Este procedimiento se hace siguiendo lo establecido por la norma UNE 112083: 2010³³. Se realiza con un multímetro eléctrico conectando el polo positivo (+) del multímetro a la armadura y el polo negativo (-) a un electrodo de referencia. Para este estudio se utilizará un electrodo de Calomelanos (SCE) y una esponja húmeda (Figura. 4-7).

Inicialmente se traza una cuadrícula de 10x10cm sobre la superficie de la losa, que permite determinar los puntos en los que se realiza la medida de potenciales y además permite realizar un mapeo de potenciales de toda la losa e identificar los cambios de potenciales con mayor precisión. Ver Figura. 4-6.

³³ UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.

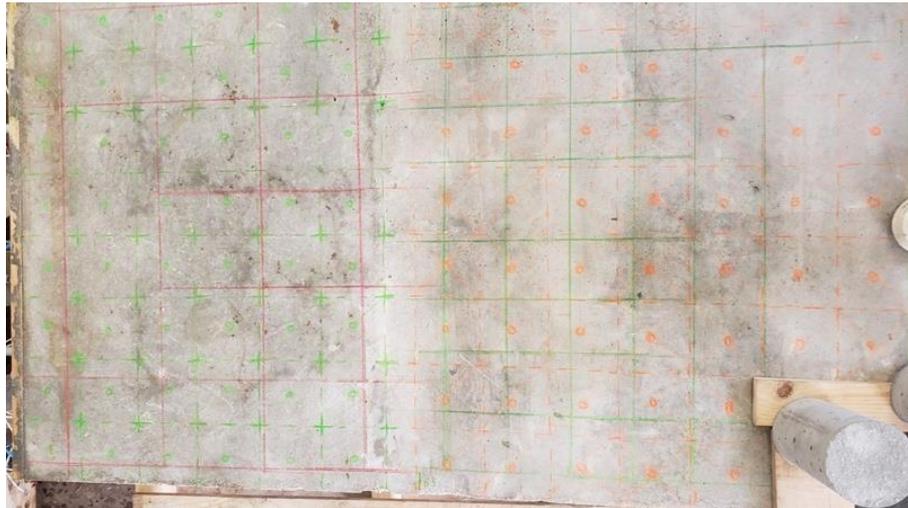


Figura. 4-6. Cuadrícula para mapeo de potenciales (fuente propia).



Figura. 4-7. Proceso de medidas de potenciales eléctricos (fuente propia).

Las medidas de potencial eléctrico se realizaron cada dos semanas, lo que permitió tener controlado los distintos potenciales de la losa. Estos se representaron mediante mapas que indican por medio de curvas de nivel los distintos valores obtenidos. Esta metodología facilita su interpretación y la localización de zonas con mayor riesgo de corrosión. Además de esto es importante mencionar que la humectación de la losa se realizó de manera periódica, para obtener medidas de potencial más estables y fiables.

4.2.2. Medida de intensidad de macrocelda (i_{macro}):

Mediante un amperímetro de resistencia casi nula (ZRA) se mide la corriente de (corriente de macrocelda) que pasa entre la armadura y los sensores.



Figura. 4-8. Medida con amperímetro de resistencia nula (ZRA)(fuente propia).

Cada medida de corriente se hace conectando la armadura al polo positivo (+) del amperímetro y el sensor al polo negativo (-), lo que permite identificar no solo la magnitud sino también la dirección de la corriente.

Esta medida de corriente de macrocelda se realizó en todos los sensores que se mantenían conectados eléctricamente a la armadura y que participaban de los mismos procesos de corrosión que la armadura general. En el esquema de la Figura. 4-9 se muestra un ejemplo de conexión entre sensor y armadura.

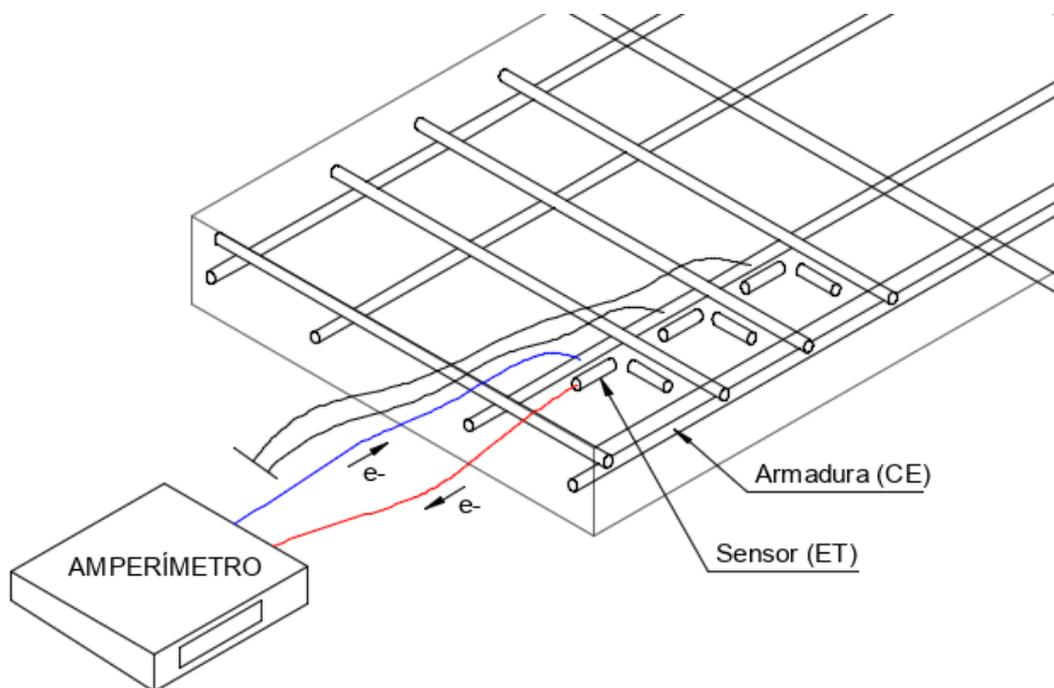


Figura. 4-9. Esquema de medida de corrientes de macrocelda sensor - armadura. (fuente propia).

4.2.3. Medida de intensidad de corrosión (i_{local}):

Se midió la intensidad de corrosión según la metodología desarrollada por el equipo de investigación del departamento de construcciones arquitectónicas de la UPV, que consistió en utilizar la técnica de extrapolación de Tafel (ATE), aplicando una secuencia de pulsos potencioestáticos por medio de tarjetas electrónicas programadas para hacer dicha secuencia (Figura. 4-10), y recibir la respuesta producida por el electrodo de trabajo. (Figura. 4-11).

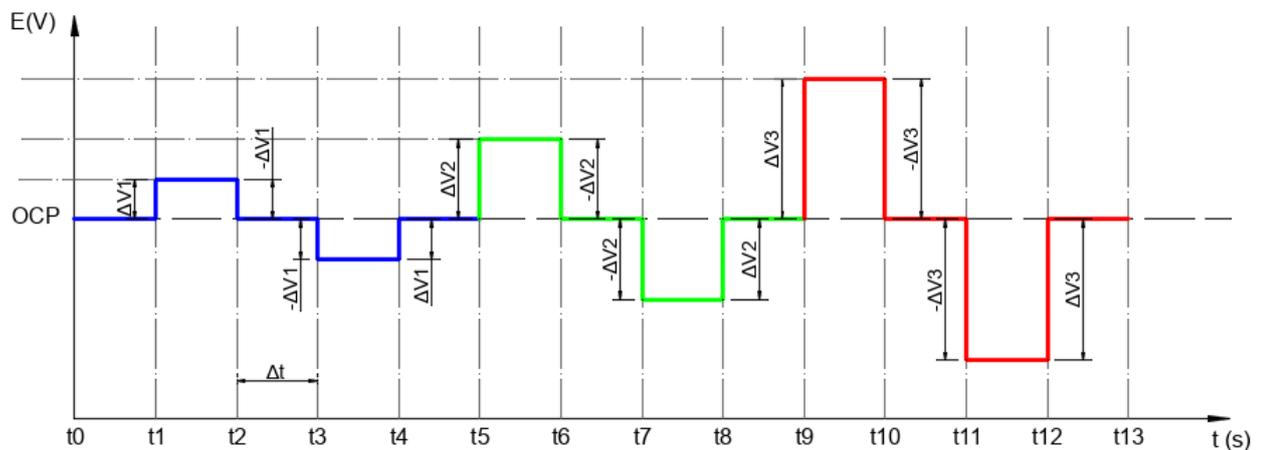


Figura. 4-10. Recopilación de imagen del capítulo 2 - Esquema de secuencia de pulsos potencioestáticos para la aplicación del método ATE. (Ramón Zamora, 2018)

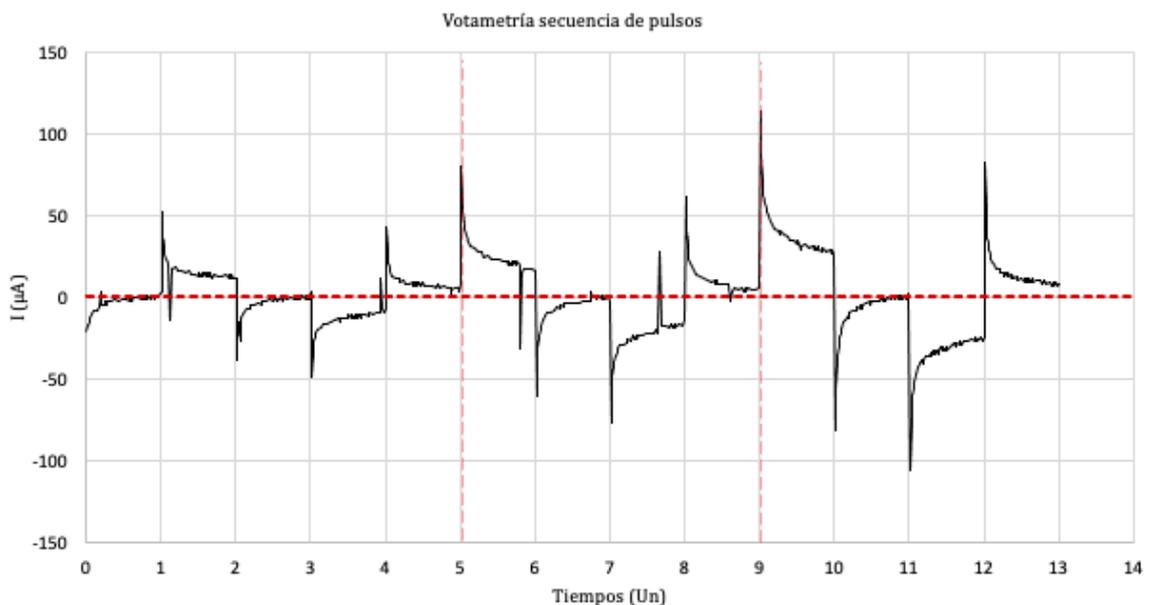


Figura. 4-11. Gráfica de respuesta eléctrica de la secuencia de pulsos aplicada para un sensor embebido en la losa de hormigón.

Tras obtener la respuesta de la secuencia de pulsos aplicada, se procedió a realizar el ajuste de las curvas para cada pulso potencioestático ($\pm 70\text{mV}$, $\pm 105\text{mV}$ y $\pm 140\text{mV}$), con base al modelo de circuito eléctrico para un proceso Farádico - no Farádico, desarrollado por el mismo grupo de investigación de la UPV.

La Figura. 4-11, muestra la respuesta real obtenida por una secuencia de pulsos aplicada a uno de los sensores ubicados en losa de hormigón armado, específicamente un sensor en estado normal (conectado) de la zona contaminada con cloruros.

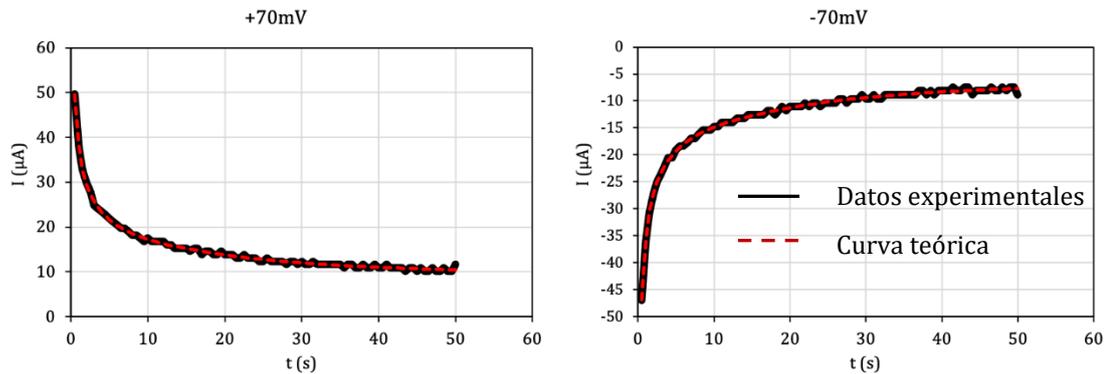


Figura. 4-12. Ajuste de curvas de respuesta eléctrica para los pulsos $\pm 70\text{mV}$

Las gráficas de intensidad de corriente vs tiempo de aplicación de pulsos potencioestáticos (50 segundos) se obtienen de los valores calculados con el modelo matemático de un circuito mixto para procesos farádicos y no farádicos (ver la expresión 2-13) mencionado en el capítulo 2.4.2 de este documento.

Posteriormente, se realizó el ajuste para cada una de las secuencias de pulsos aplicados para los valores calculados con los puntos obtenidos de las tarjetas eléctricas. Este proceso se realizó con la ayuda del software Solver de Excel.

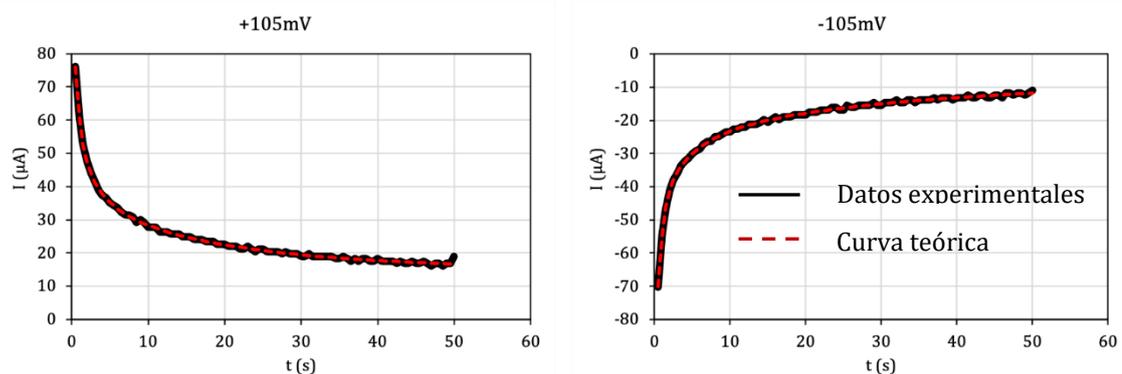


Figura. 4-13. Ajuste de curvas de respuesta eléctrica para los pulsos $\pm 105\text{mV}$.

La Figura. 4-12, muestra el ajuste realizado para los pulsos aplicados de $+70\text{mV}$ y -70mV . Los valores representados en color negro son los obtenidos como respuesta a los pulsos aplicados y los valores en color rojo los calculados según el modelo matemático para un circuito mixto. El error cuadrático de ajuste para estas gráficas es

inferior al 5%, lo que valida el modelo matemático establecido por los investigadores del departamento de construcciones arquitectónicas de la UPV.

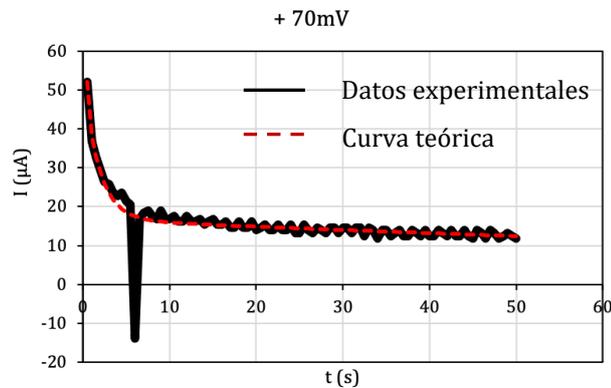


Figura. 4-14. Ejemplo de saltos de respuesta a los pulsos.

En algunos casos como se puede ver en la Figura. 4-14, los valores de respuesta a los pulsos presentan unos saltos. Estos son ocasionados por el ruido eléctrico que puede haber en las instalaciones del laboratorio. Sin embargo, no afecta el ajuste de los datos.

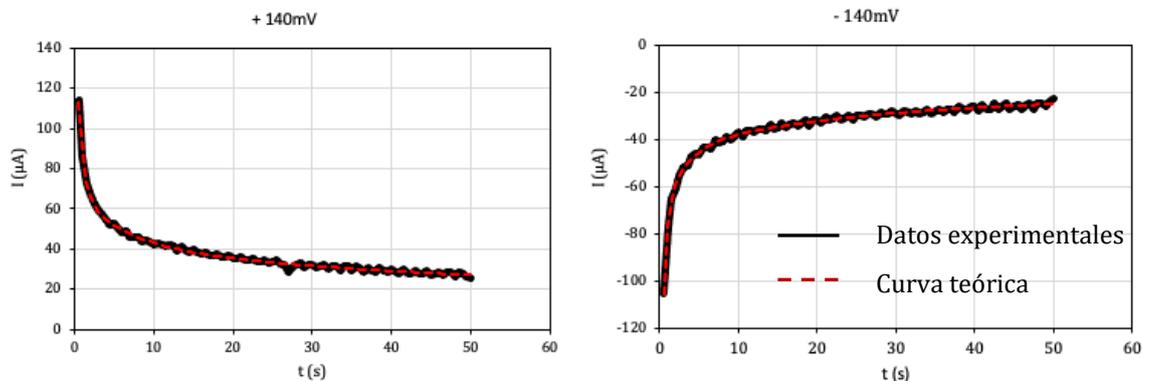


Figura. 4-15. Ajuste de curvas de respuesta eléctrica para los pulsos $\pm 140\text{mV}$.

El mismo procedimiento se realiza para los pulsos $\pm 105\text{mV}$ (Figura. 4-13) y $\pm 140\text{mV}$ (Figura. 4-15), El ajuste de cada una de las curvas de cada pulso aplicado se debe realizar manualmente para cada una de las medidas de corrientes de cada sensor, por lo que resulta un trabajo laborioso de realizar y proporciona un número de resultados muy amplio.

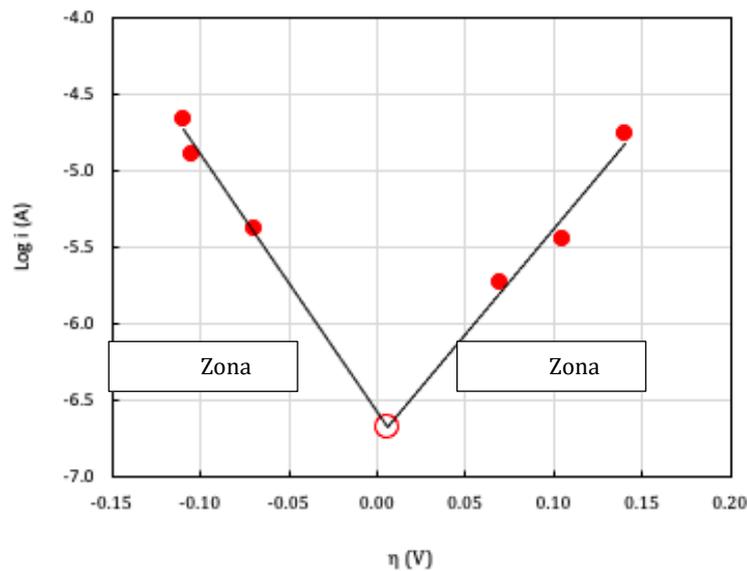


Figura. 4-16. Representación gráfica del método ATE para un sensor embebido en la losa de hormigón.

Una vez efectuado el ajuste de las curvas de cada pulso, se representan los resultados en la gráfica mostrada en la Figura. 4-16 y se obtienen las rectas en la zona catódica y la zona anódica.

Como se mencionó en el capítulo 2.4.2, el valor de las ordenadas ($\log i$) en el punto de intersección de ambas rectas, normalizado por la superficie del sensor, permite obtener la intensidad de corriente que se produce de manera local en el electrodo de trabajo.

Asimismo, al realizar el ajuste de cada curva, se obtienen los parámetros del circuito equivalente utilizado para modelizar el sistema acero-hormigón: R_{s1} , R_{s2} , C_{d1} , C_{d2} , R_p .

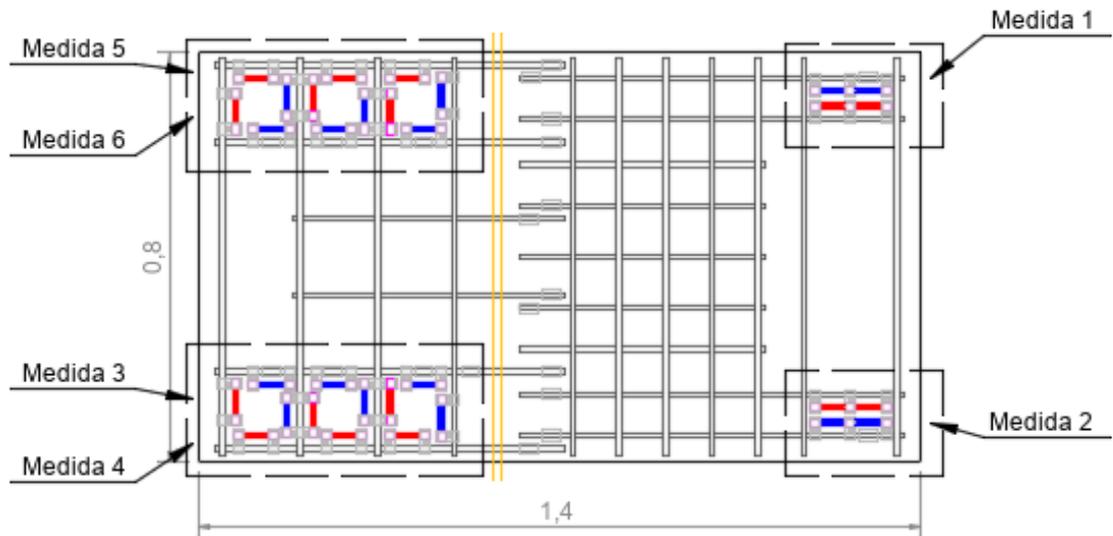


Figura. 4-17. Esquema de medidas de corrientes de corrosión en losa de hormigón.(fuente propia)

Este procedimiento se realizó para determinar la corriente local (i_{local}) en cada uno de los sensores, tanto en los que se encuentran en estado normal (conectado), como los que están en estado de medida (no conectado).

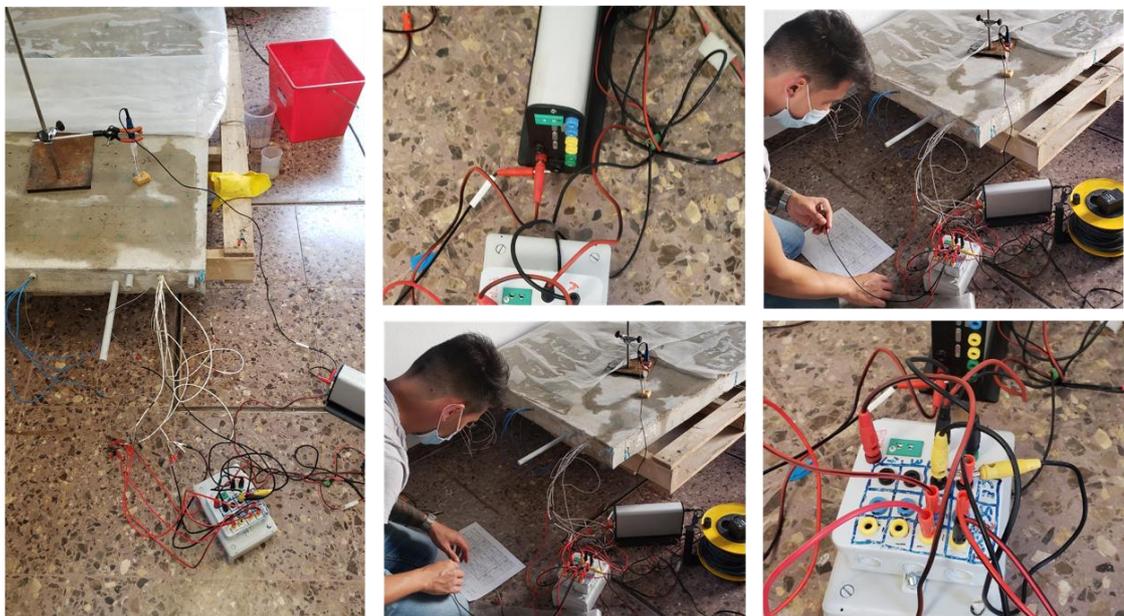


Figura. 4-18. Proceso de medida de intensidad de corrientes con el método de pulsos potenciostáticos. (fuente propia)

Las diferentes medidas llevadas a cabo sobre la losa se realizaron en el laboratorio de electroquímica de la UPV. Este centro cuenta con un equipo de medida portátil con diferentes tarjetas programadas para la medición autónoma, y con la capacidad de

ejecutar 12 medidas al mismo tiempo. Debido a ello, y como se muestra en la figura 4-17, los sensores embebidos en la losa se dividieron en un total de 6 medidas.

Cada una de las medidas corresponde a las siguientes configuraciones:

- Medida 1: Dos sensores conectados y dos sensores no conectados. (zona catódica)
- Medida 2: Dos sensores conectados y dos sensores no conectados. (zona catódica)
- Medida 3: Seis sensores conectados (zona anódica)
- Medida 4: Seis sensores no conectados (zona anódica)
- Medida 5: Seis sensores conectados (zona anódica)
- Medida 6: Seis sensores no conectados (zona anódica)

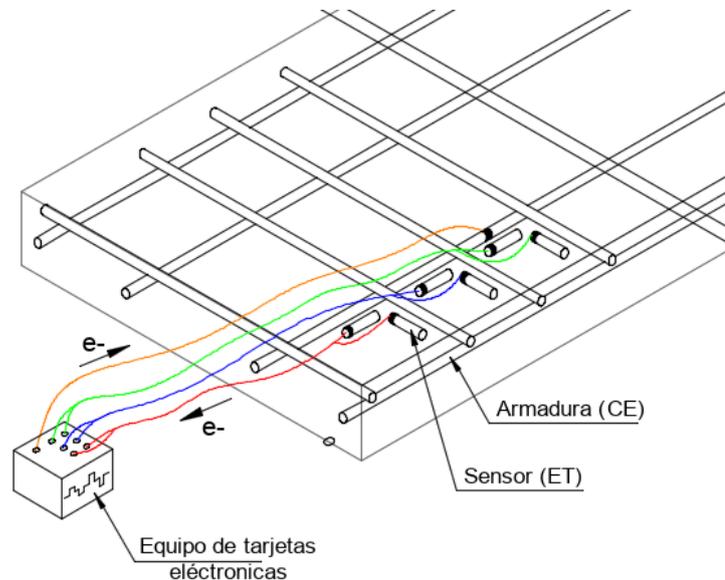


Figura. 4-19. Esquema de conexión de sensores a las tarjetas electrónicas. (fuente propia).

El esquema mostrado en la Figura. 4-19 muestra un ejemplo de la conexión de una de las medidas con las tarjetas electrónicas. Las medidas se realizaron tras 28 días de curado del hormigón y la frecuencia fue de dos mediciones por semana.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del hormigón y las medidas realizadas sobre la losa de hormigón. La caracterización del hormigón permite determinar la calidad del material y los ensayos en la losa aportan información sobre los procesos de corrosión que están sufriendo las armaduras.

5.2. Ensayos de caracterización

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de caracterización están recogidos en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Resultado de ensayos de caracterización. (fuente propia)

Ensayo	Resultado
Resistencia a compresión	31,86 MPa
Porosidad accesible al agua	15,81 %
Coefficiente de capilaridad	72,75
Coefficiente de migración (Dnssm)	$53,843 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$
Resistividad eléctrica.	(52 - 75) Ωm

Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización permiten hacer una estimación del grado de durabilidad del hormigón. Según la clasificación establecida por algunos autores ³⁴se tiene:

Tabla 5-2. Clasificación de durabilidad hormigón de trabajo. (fuente propia)

Ensayo	Resultado	Indicador de durabilidad
Porosidad accesible al agua	15,81 %	Baja
Coefficiente de migración (Dnssm)	$53,843 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	Muy baja
Resistividad eléctrica.	(52 - 75) Ωm	Baja

La Tabla 5-2, muestra los indicadores de durabilidad de los ensayos realizados al hormigón de trabajo de esta investigación, se observa que, a pesar de ser un hormigón aceptado por la normativa, no presenta indicativos de durabilidad buenos.

³⁴ Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C. A., Skoczlas, F., & Corvez, D. (2013). Durability of and Ultra high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) under progressive aging. *Cement and concrete research*, 13.

Tabla 5-3. Indicador de durabilidad del hormigón. (Wang, y otros, 2013)

		Classification and limit values				
Potential durability indicator		Very low	Low	Average	High	Very high
G	Porosity accessible to water (%) P_{water}		14 to 16	12 to 14	9 to 12	6 to 9
S	Porosity measured by mercury intrusion (%) P_{Hg}	>16	13 to 16	9 to 13	6 to 9	3 to 6
S	Electrical resistivity (Ohm·m)	<50	50 to 100	100 to 250	250 to 1000	>1000
G	Effective chloride diffusion coefficient ($10^{-12} m^2 s^{-1}$) D_{eff}	>8	2 to 8	1 to 2	0.1 to 1	<0.1
G	Apparent chloride diffusion coefficient (measured by a migration test) ($10^{-12} m^2 s^{-1}$) $D_{app(mig)}$	>50	10 to 50	5 to 10	1 to 5	<1
G	Apparent chloride diffusion coefficient (measured by a diffusion test) ($10^{-12} m^2 s^{-1}$) $D_{app(diff)}$				<5	
G	Apparent gas permeability (at $P_{upstream}=2MPa$ and after drying at $T=105^{\circ}C$) ($10^{-18} m^2$) K_{gas}	>1000	300 to 1000	100 to 300	10 to 100	<10
G	Liquid water permeability (at P_{max} by direct flowrate measurement, after saturation) ($10^{-18} m^2$) K_{liq}	>10	1 to 10	0.1 to 1	0.01 to 0.1	<0.01
	Concrete type (indicative) (European EUROCODE2 denomination)		C25 to C35	C30 to C60	C55 to C80	>C80

5.3. Mapeo de potenciales

Como se mencionó anteriormente, la medición de potenciales eléctricos es una medida cualitativa que permite establecer una probabilidad de corrosión de acuerdo con los rangos establecidos por la UNE 112083³⁵.

Como se describió en el apartado 4.2.1, los potenciales de la armadura de la losa se midieron con una periodicidad de una vez cada dos semanas, lo que genera una cantidad importante de resultados. Sin embargo, con el fin de simplificar, se muestran en este apartado los mapas de potenciales de la medida inicial, de una medida 43 días después y de otra realizada las últimas semanas de monitorización de la losa.

³⁵ UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.

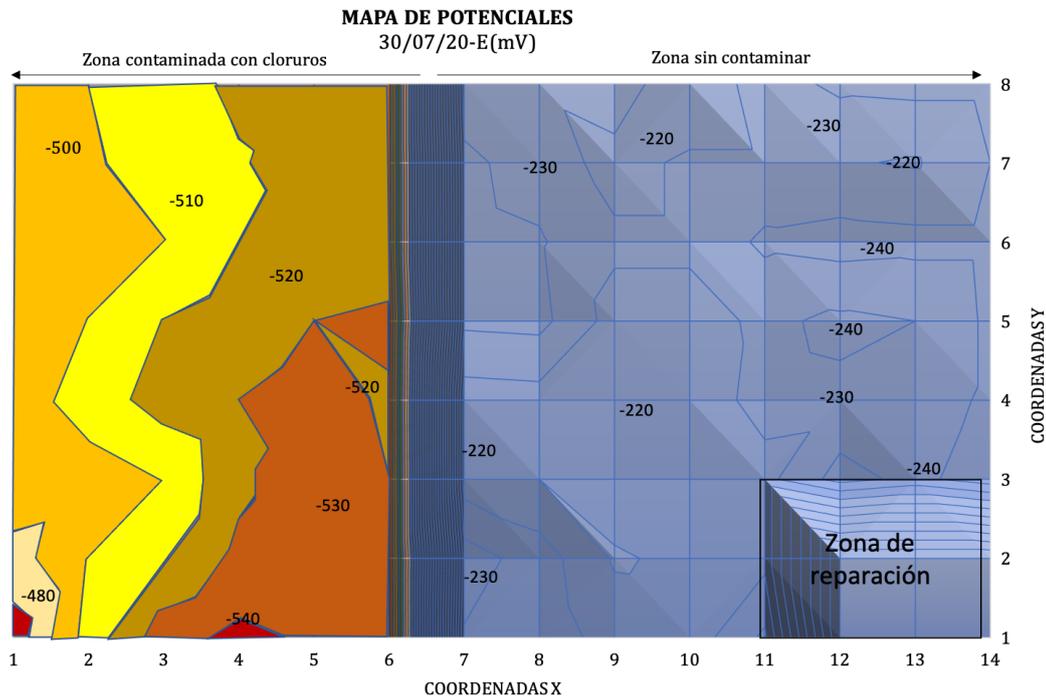


Figura. 5-1. Mapa de potenciales eléctricos (mV) 30/07/2020

Los resultados de los potenciales eléctricos (E_{corr}) iniciales (Figura. 5-1) permiten diferenciar claramente la zona anódica de la catódica, siendo la diferencia de potenciales de aproximadamente 300mV.

Esto permite confirmar la existencia de dos regiones claramente diferenciadas, y el alto grado de riesgo de corrosión en la zona con cloruros y, por lo tanto, la aparición de fenómenos de macrocelda entre esta zona y la parte con potenciales menos negativos.

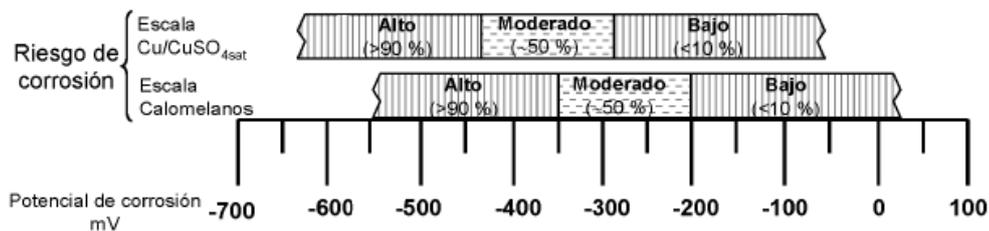


Figura. 5-2. Recopilación de imagen del capítulo 2 - Probabilidad o riesgo de corrosión activa. (UNE 112083, 2010)

Según la escala de rangos establecida por la norma UNE 112083³⁶ ver Figura. 5-2, los potenciales medidos en la zona catódica (zona sin contaminar con cloruros) tienden a

³⁶ UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.

tener un riesgo moderado de corrosión a diferencia de la zona anódica (zona contaminada con cloruros) que presentan un riesgo o probabilidad de corrosión alto.

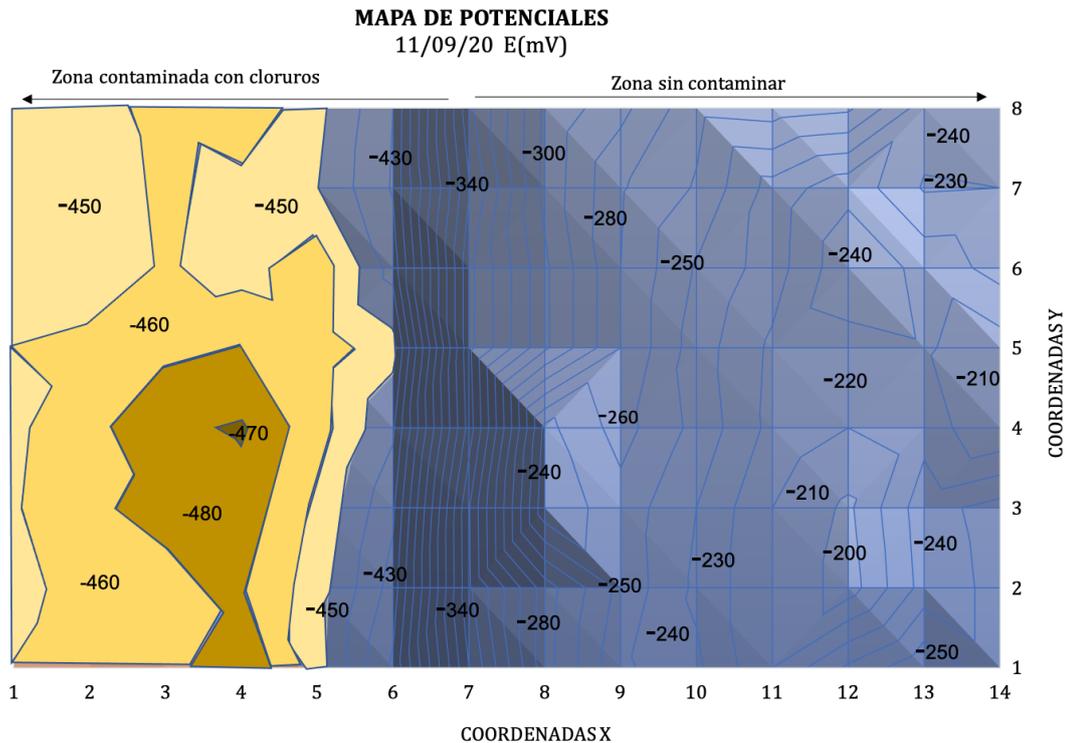


Figura. 5-3. Mapa de potenciales eléctricos (mV) 11/09/2020

En la Figura. 5-3 se evidencia una reducción de potenciales en la zona contaminada con cloruros con respecto a la medida de potenciales tomada tras el periodo de curado del hormigón (30/07/20). También se observa que en la zona sin contaminar situada junto a la zona contaminada los potenciales han aumentado, lo que indica una posible difusión de cloruros que aumenta el riesgo de corrosión en esa zona

De igual manera la probabilidad o riesgo de corrosión en las armaduras de la losa para esta medida, según la tabla de clasificación es moderado para la zona sin contaminar y alto para la zona contaminada.

Como resultado de medida final, se muestra un mapa de potenciales de la última medida realizada (Figura. 5-4), donde puede observar una estabilización de los niveles de electronegatividad en la zona contaminada y una disminución en la zona sin contaminar, con respecto a los valores del mapa de la Figura. 5-3. Sin embargo, la distinción de zonas continúa siendo notoria con diferencias de valores de hasta 160 mV.

Al final del estudio en la Figura. 5-4, se observa que los niveles de corrosión para la zona sin contaminar pasaron a estar en un riesgo bajo con una probabilidad menor al 10% de presentar procesos de corrosión.

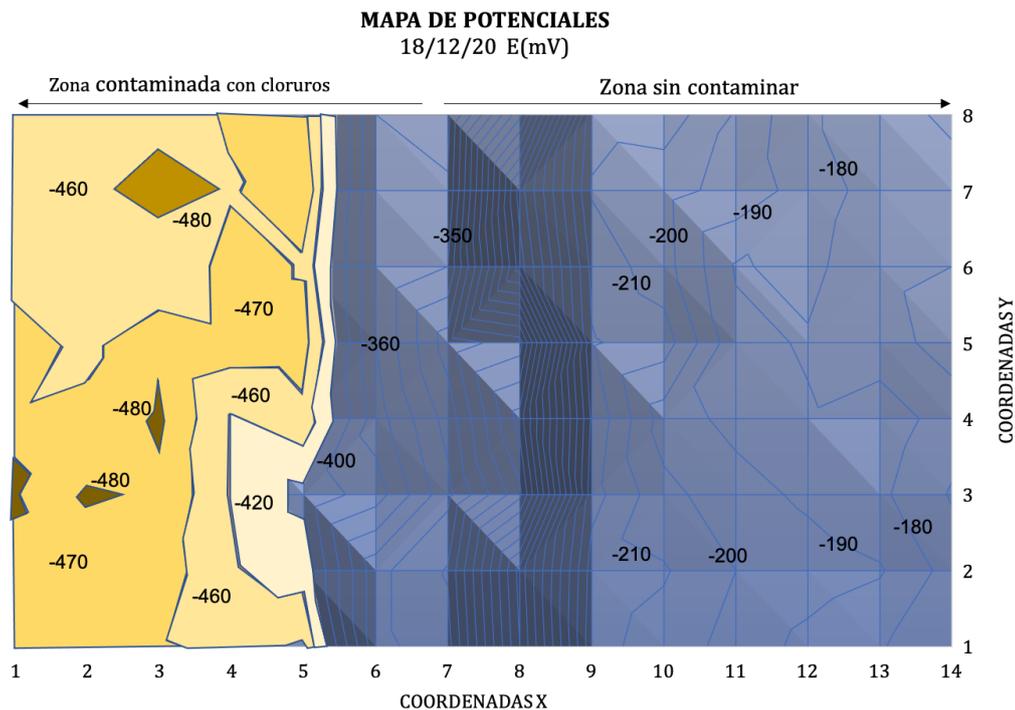


Figura. 5-4. Mapa de potenciales eléctricos (mV) 18/12/2020

5.4. Medidas de los parámetros de corrosión

A diferencia del apartado anterior, en el que se han realizado mediciones de potencial en las armaduras, en este punto se analizan los parámetros cinéticos obtenidos en cada uno de los sensores embebidos. Los valores graficados son el promedio de los datos registrados por cada sensor según su estado y la zona en la que está ubicado.

5.4.1. Potencial eléctrico sensores (E_{corr})

El primer parámetro que se analizó fue el potencial eléctrico de todos los sensores embebidos en la losa de hormigón armado, ya que el estudio de este valor permite establecer el OCP sobre el cual se aplica la secuencia de pulsos para la medida de la intensidad de corrosión.

En las siguientes imágenes se muestra un promedio de valores de potencial eléctrico de los sensores conectados y desconectados, en la zona contaminada con cloruros y la zona sin contaminar.

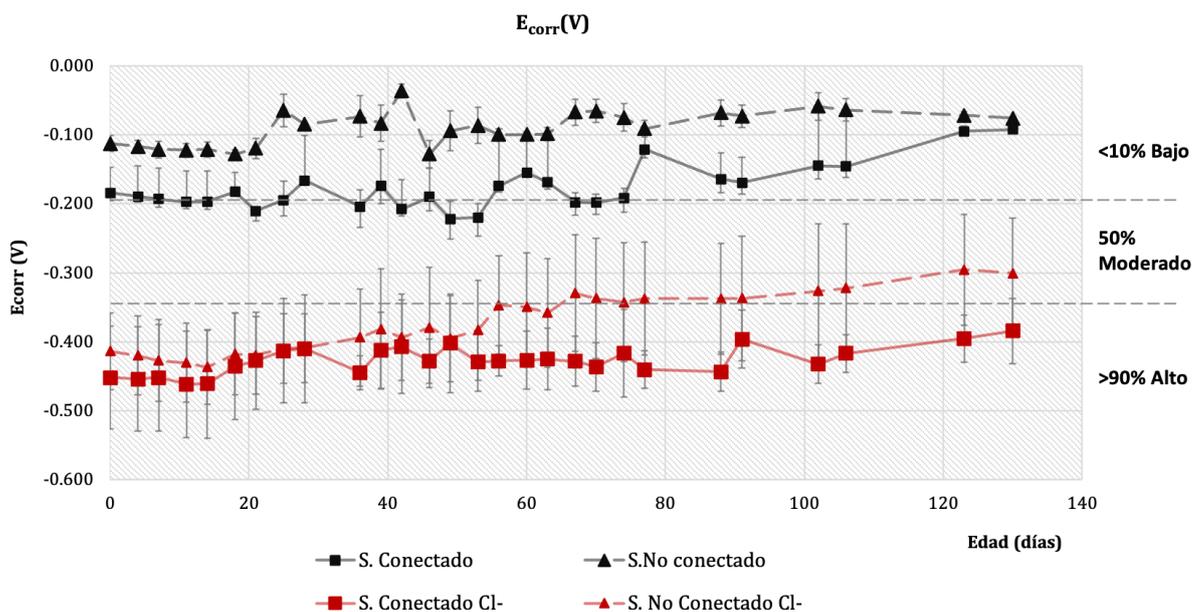


Figura. 5-5. Representación gráfica de potencial de corrosión de los sensores embebidos en la losa de hormigón armado

En la Figura. 5-5, se puede observar la diferencia de potenciales entre los sensores que están en la zona contaminada con cloruros y los que están en la zona sin contaminar.

Los sensores en la zona con cloruros representados con color rojo tienden a tener potenciales que indican riesgos de corrosión alta, a diferencia de los sensores ubicados en la zona sin contaminar que indican un riesgo bajo (riesgo de corrosión establecido según la Figura. 5-2).

Además de esto, se puede observar que los sensores con valores de potencial más negativo son aquellos que permanecen constantemente conectados al armado y participan de los procesos de macrocelda.

Una vez medido el OCP, mediante el sistema ATE definido anteriormente, se pudo medir la cinética de corrosión de cada uno de los sensores. En los siguientes apartados se detallan algunos de los parámetros obtenidos empleando este procedimiento.

5.4.2. Resistencia a la polarización (R_p)

En este apartado se recogen los valores promedio de resistencia a la polarización de los sensores embebidos en la losa, conectados y no conectados. Se representan en color rojo los valores de los sensores en la zona con cloruros y en color negro los sensores embebidos en la zona sin contaminar.

La resistencia R_p aporta información sobre la dificultad de que en una zona se produzca la corrosión activa del metal, de tal manera que un menor valor indica que esa

zona es más susceptible de que se corroa activamente³⁷. Consecuentemente con ello, en la Figura. 5-6, se observa que los valores registrados en la zona contaminada con cloruros son menores ya que es en esa zona donde se favorece la corrosión activa del metal.

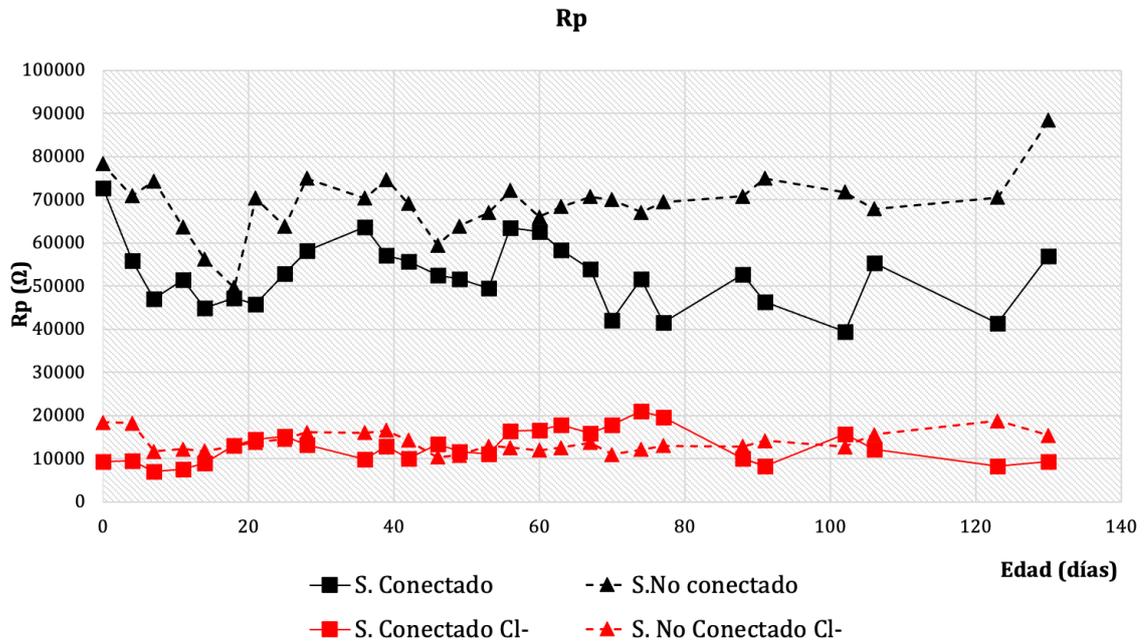


Figura. 5-6. Representación gráfica de los valores de Rp para los sensores embebidos en la losa de hormigón armado (fuente propia).

5.4.1. Capacidad de la doble capa (C_{dl})

La capacidad de la doble capa en los sensores embebidos en la estructura se representa en la Figura. 5-7, donde se puede observar una clara diferencia entre la zona contaminada con cloruros (rojo) y la zona sin contaminar (negro).

Este parámetro es un indicador de la corrosión. Niveles de corrosión más elevados tienden a dar valores de capacidad mayores, pudiendo estar relacionados estos valores con la formación de óxidos en la superficie del metal que aumentan la capacidad del condensador (apartado 2.4.2).³⁸ En este sentido, los valores 30 veces más altos de C_{dl} obtenidos en los sensores situados en la zona con cloruros señalan nuevamente la existencia de una corrosión mucho más activa en dicha zona.

³⁷ Ramón Zamora, J. E. (2018). *Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

³⁸ Ramón Zamora, J. E. (2018). *Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

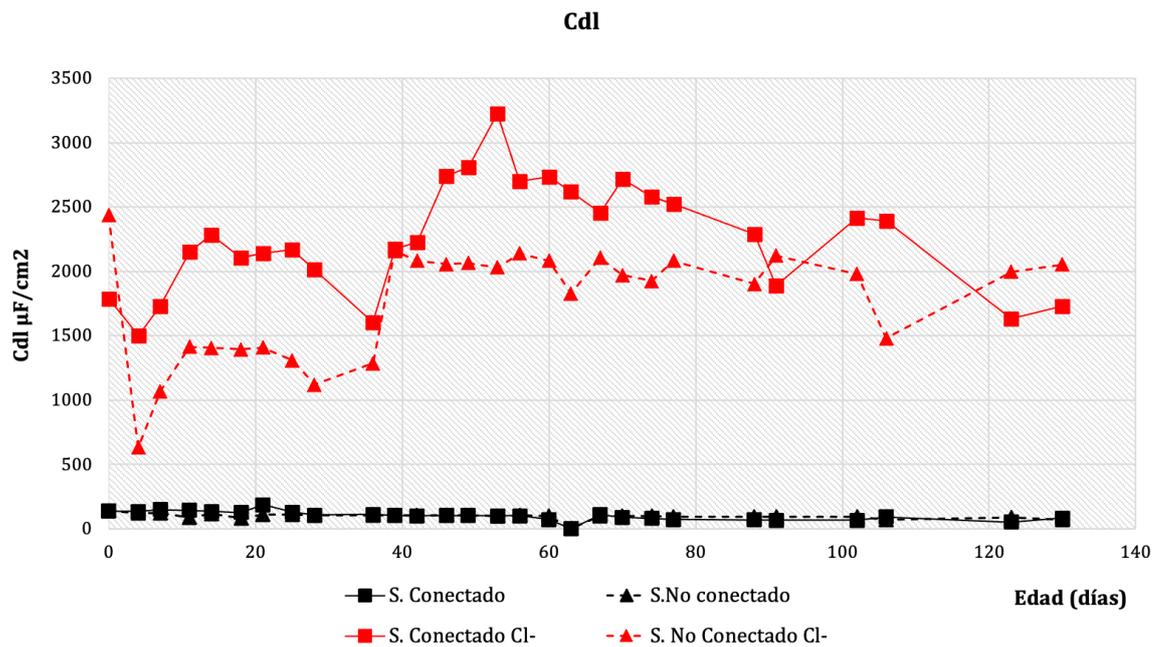


Figura. 5-7. Representación gráfica de los valores de la capacidad de la doble capa

5.4.2. Densidad de corriente (j_{corr})

En la siguiente figura se representan los valores obtenidos de la densidad de corriente de corrosión (j_{corr}) en los sensores mediante la aplicación del método ATE. Esta gráfica es de gran interés, ya que se puede evidenciar con qué magnitud se está corroyendo localmente la armadura y la diferencia que hay entre los sensores conectados y los no conectados.

Los sensores ubicados en la zona sin contaminar se mantienen a lo largo del tiempo con un grado de corrosión despreciable (valores inferiores a $0,1 \mu A/cm^2$). Sin embargo, en los sensores ubicados en la zona contaminada con cloruros se registran valores de corrosión altos desde las primeras medidas, pero con el paso del tiempo tienden a disminuir, aunque se mantiene un grado de corrosión moderado (valores entre $0,1$ y $0,5 \mu A/cm^2$).³⁹ Inicialmente, cuando el sistema aún no es estable debido las reacciones que se están produciendo en el entorno (ataque de los cloruros y formación de la capa pasiva), se suelen obtener intensidades de corrosión más inestables y elevadas. A medida que pasa el tiempo y sin la existencia de perturbaciones en el entorno, el sistema tiende al equilibrio y, por tanto, la densidad de corrosión se estabiliza, pudiendo a partir de ese momento identificar con más claridad el grado de corrosión de la zona monitorizada. Así, por ejemplo, a la edad de 130 días la velocidad de corrosión de las armaduras en la zona con cloruros es del orden de 12,5 veces mayor que en la zona sin cloruros.

³⁹ Bertorlini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2014). *Corrosion of steel concrete. prevention, diagnosis, repair*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

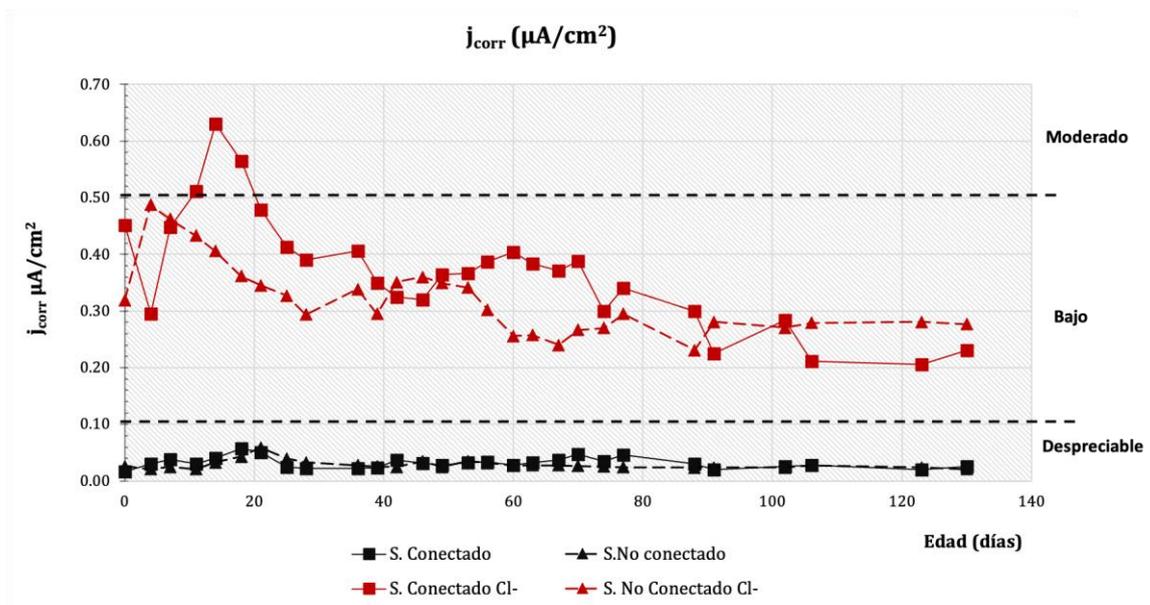


Figura. 5-8. Representación gráfica de los valores de densidad de corriente j_{corr} de los sensores embebidos en la losa de hormigón armado.

5.4.3. Densidad de corriente de macrocelda (j_{macro})

En la siguiente figura se representan los valores promedio de la densidad de corriente de macrocelda medida en los sensores conectados a la armadura de la losa. La intensidad de corriente se ha normalizado por la superficie del electrodo analizado ($15,71 \text{ cm}^2$).

Los sensores localizados en la zona contaminada con cloruros presentan inicialmente unas corrientes de corrosión de macrocelda altas. Con el paso del tiempo, estos valores tienden a disminuir, e incluso pasan a ser negativos. Esto se puede deber a que en la losa de hormigón existan zonas de la armadura con un mayor grado de corrosión que la de los propios sensores, lo que hace que estos elementos actúen como cátodo y sus medidas sean negativas a pesar de encontrarse en un medio agresivo.

Las zonas que pueden presentar mayor grado de corrosión en la estructura son las zonas donde se unen las barras del mallazo, es decir donde se cruzan y están en contacto las barras longitudinales con las horizontales. En estos encuentros hay menor presencia de oxígeno, lo que favorece que estas zonas tengan mayor grado de corrosión y por lo tanto actúen como ánodos dentro de un macro ánodo.

Por lo que respecta a los sensores ubicados en la zona sin contaminar, no se registran valores importantes de intensidad de corrosión por el efecto de macrocelda, ya que su estado normal es actuar como cátodos. Así pues, en este caso, los sensores se mantienen exactamente en las mismas condiciones que la armadura a la que están conectados.

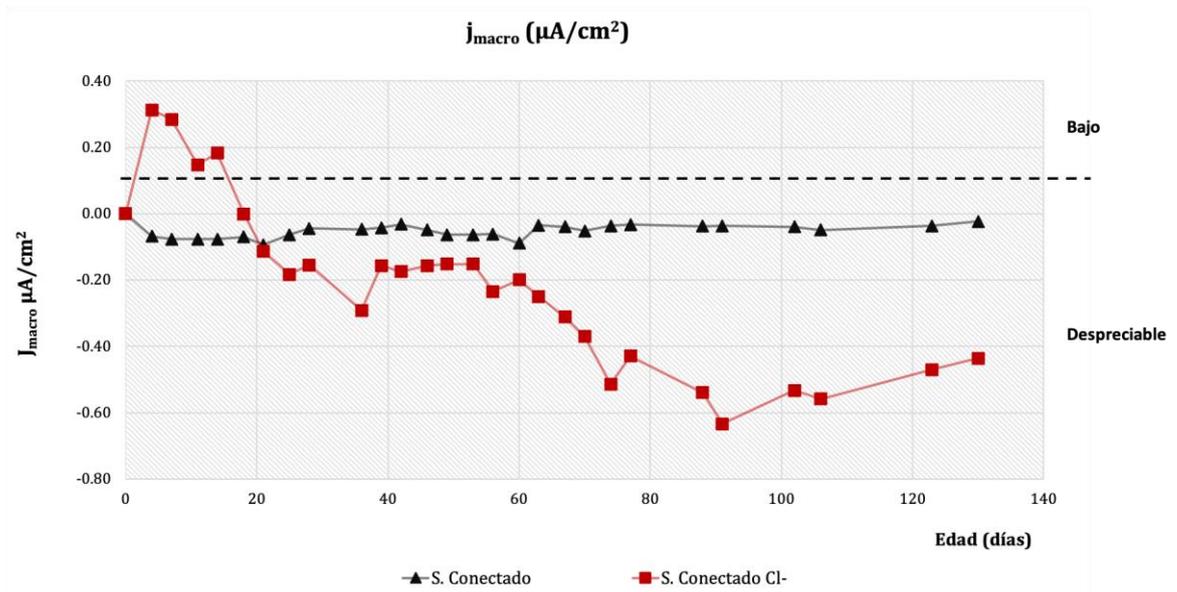


Figura. 5-9. Representación gráfica de la densidad de corriente de macrocelda j_{macro} en la losa de hormigón armado.

5.4.4. Densidad de corriente total (j_{total})

Como se mencionó en el capítulo 2.4.3, la densidad de corriente total (j_{total}) es la suma de la corriente local (j_{corr}) y la corriente de macrocelda (j_{macro}). La Figura. 5-10 representa los valores de j_{total} resultantes en esta investigación.

En la gráfica se puede ver cómo la corriente de corrosión en los sensores conectados y ubicados en la zona contaminada es elevada durante las primeras medidas realizadas, pero con el paso del tiempo el valor disminuye y tiende a estabilizarse. Esto se debe a la influencia que ejercen las corrientes de macrocelda en los sensores. El cambio apreciado en el apartado anterior tiene su repercusión en la densidad de corriente total obtenida para cada sensor. En el caso de los sensores que se encuentran en la zona contaminada, pero están desconectados de la armadura, se evidencia una estabilidad en su grado de corrosión. Esto permite conocer los procesos por los que pasa la armadura de manera local debido al ataque por cloruros, sin tener en cuenta los procesos generados por las corrientes de macrocelda.

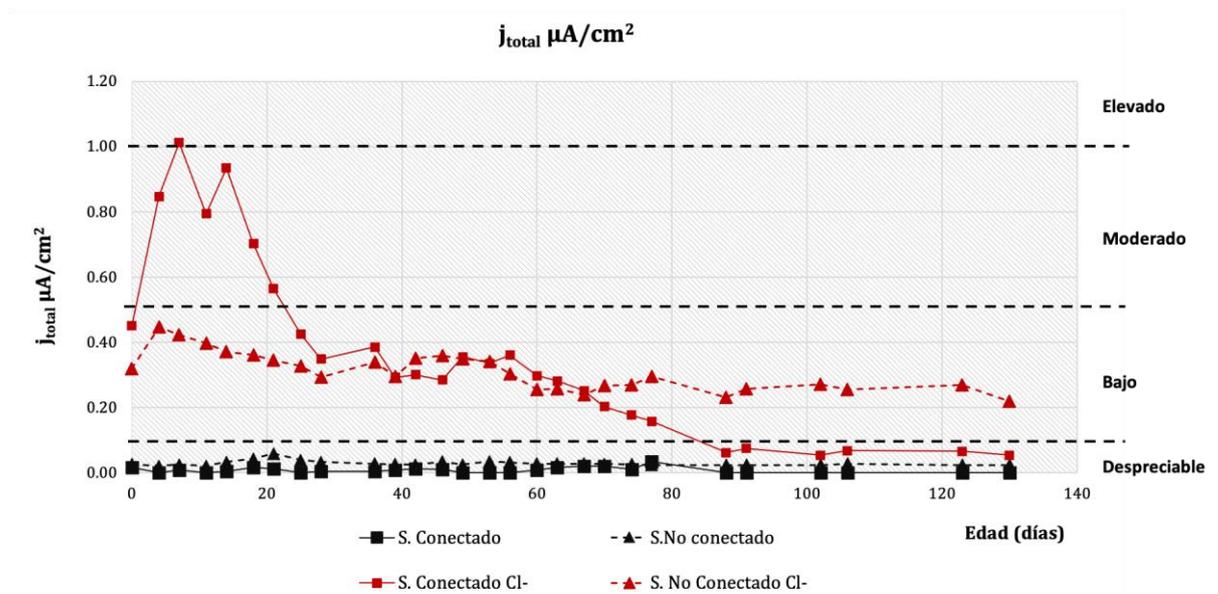


Figura. 5-10. Representación gráfica de la intensidad de corriente total en las armaduras de la losa de hormigón armado.

Por lo que respecta a los sensores ubicados en la zona sin contaminar, se puede ver que la corrosión es insignificante, tanto en los conectados como en los no conectados, ya que se encuentran en la zona pasiva de la estructura.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En primer lugar, se debe mencionar que este trabajo ha recogido una gran cantidad de datos sobre el elemento estructural a escala analizado, la losa. Sin embargo, esta pieza seguirá siendo monitorizada por los miembros del grupo de investigación ya que se ha observado que puede ser un banco de pruebas y trabajo de gran interés.

Aun así y con los datos obtenidos en este estudio, se pudo determinar la influencia que tienen las corrientes generadas por los procesos de macrocelda en una estructura real. También es reseñable que, a pesar de no obtener valores de corrosión altos, se logró evidenciar el comportamiento de las corrientes de corrosión que se presentaron en la estructura durante el tiempo de estudio.

Se pudo detectar la diferencia de comportamiento cinético y electroquímico que hay entre una zona y otra debido a la presencia y ataque de cloruros en una de ellas. Aunque este hecho se hace evidente en todos los parámetros analizados, el indicador más claro y que más información aporta sobre el diferente comportamiento de los sensores fue la densidad de corrosión local. Los sensores embebidos en la zona contaminada del hormigón presentaron valores 20 veces mayores de grado de corrosión con respecto a los sensores embebidos en la zona sin contaminar.

Por otra parte, se pudo observar que los procesos de corrientes macrocelda en una estructura tienen la capacidad de aumentar la corrosión aproximadamente dos veces sobre las corrientes que se presentan de manera local. Esto se evidenció durante las primeras medidas. Sin embargo, con el paso del tiempo, el valor de las corrientes de macrocelda disminuyó paulatinamente.

Por tal motivo, es de vital importancia que la medida de la corriente de macrocelda se implemente al sistema de INESCOM de manera que se mida de forma automática como lo hace con la corriente local, así se tendrá el valor real de los procesos de corrosión a los que se somete el armado de una determinada zona a monitorizar.

De igual manera se pudo evidenciar que, en una estructura de hormigón armado, puede presentarse dentro de una misma zona anódica, zonas más activas que otras. Razón por la cual, es importante monitorizar la estructura por medio de sensores conectados y no conectados a la armadura general. Esto permite obtener bastante información de los procesos de corrosión por los que esta pasando la estructura.

Es importante continuar con la monitorización de la corrosión en la estructura de esta investigación, ya que a más largo plazo se podrán obtener valores más representativos del proceso de deterioro que se está produciendo.



CAPÍTULO 7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

La estructura de hormigón armado ejecutada para este trabajo tiene mucho interés, ya que se puede continuar analizando y profundizar la investigación de los procesos de corrosión en una estructura real.

Continuar la toma de medidas de corrientes de corrosión sería útil para estudiar estos procesos a largo plazo. Además, es importante revisar periódicamente la superficie de la losa, con el fin de verificar si existe la presencia de fisuras. Los datos obtenidos a lo largo de este trabajo para la zona 5 de la losa muestran un ligero incremento frente a los valores de la zona 4, homóloga a esta, pero en el lado opuesto. Una de las causas podría ser la presencia de fisuras. A la finalización de este trabajo no se ha podido llevar a cabo dicho estudio, pero puede aportar más información a futuras investigaciones.

Por otro lado, sería interesante, de igual manera, acelerar los procesos de corrosión aumentando la concentración de cloruros en la zona anódica. Esto se podría conseguir con la fabricación de un encofrado en PVC sellado e impermeabilizado, que se pudiese ubicar sobre la superficie de la losa únicamente en la parte de la zona anódica. Con este montaje se podría favorecer la penetración de cloruros a la estructura por medio de una columna de agua con cloruros. Esto acelerará el proceso en el que se corroen las armaduras de la zona anódica, lo que permitirá poder estudiar y evidenciar los diferentes cambios que sufre la armadura debido al ataque de los cloruros.

Así mismo, esta metodología serviría para estudiar las corrientes corrosión y su comportamiento ante un nuevo escenario. Además, permitiría obtener valores más altos de las corrientes de macrocelda, lo que sería de gran utilidad como complemento de este trabajo.

Otro estudio de gran interés será el análisis de las armaduras visualmente. Transcurrido un largo periodo de tiempo, sería interesante retirar el recubrimiento de las armaduras en cada una de las zonas. La finalidad de esta intervención sería evidenciar y tener una imagen visual de los daños que puede causar la corrosión en una estructura de hormigón armado. Poder visualizar la armadura de esta losa tras sufrir procesos de corrosión, permitirá analizar y resolver ciertas hipótesis. Una de estas hipótesis que más interés ha despertado es analizar si las zonas de intersección de armado forman ánodos de gran electronegatividad dentro de las zonas contaminadas. Esto solo se puede comprobar mediante inspección visual.

Por otra parte, también sería de gran interés conocer el grado de contaminación real de cloruros de la zona contaminada. La cantidad de cloruros introducida durante el amasado puede haber reaccionado con ciertos componentes del hormigón y no alcanzar el porcentaje del 3% de contenido respecto al peso de cemento inicial. Analizar este parámetro también puede aportar información sobre el estado de la losa. Para ello se requiere la utilización de técnicas de valoración química avanzadas.

CAPÍTULO 8. Bibliografía

- Bermudez, R. (27 de Septiembre de 2015). *Slideshare*. Obtenido de Corrosión: <https://es.slideshare.net/reinaldozequea/corrosión>
- Bertorlini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel concrete. prevention, diagnosis, repair*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- CEB, C. E.-I. (1998). *Boletín 243, "Strategies for testing and assessment of concrete structures"*.
- DURACERO. (s.f.). Obtenido de Hierros para la construcción: <https://www.duracero.com/hierros-construccion/barras-corrugadas>
- Fernández Domene, R. M., Sánchez Tovar, R., Lucas Granados, B., García Antón, J., & València, U. P. (2018). *Corrosión*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Gandia Romero, J. M. (2014). *Tesis doctoral, Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Hume ingeniería. (09 de 07 de 2015). *HUMEingeniería*. Obtenido de HUMEingeniería: <https://humeingenieria.es/blog/corrosion-de-armaduras-por-filtracion/>
- Kanematsu, H., & Barry, D. (2016). *The Fundamentals of Corrosion Science and Engineering: Equilibrium Theory and Its Meaning*. Tokyo: Springer.
- Martínez Ibernón, A. (2017). *Modelización de procesos de macropar galvánico en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat politècnica de València.
- Meneses, R. S., Moro, J. M., Alvedaño, R. R., & Ortega, N. F. (2007). *Construcciones UCE*. Obtenido de Influencia del espesor del recubrimiento de elementos de hormigón armado expuestos a procesos de corrosión y sometidos a cargas externas: <https://construccionesuce.wordpress.com/2020/03/27/influencia-del-espesor-del-recubrimiento-de-elementos-de-hormigon-armado-expuestos-a-procesos-de-corrosion-y-sometidos-a-cargas-externas/>
- Ministerio de fomento. (2008). *EHE-08. Instrucción de hormigón estructural*. España.
- Muñoz Portero, M. J. (2011). *Características y usos de los diagramas de Pourbaix*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- NT BUILD 492. (1999). *Chloride migration coeficient from non- steady - state migration experiments*. Nordic.
- Ochoa Fernández, P. (2019). *Determinación de corrientes de macropar en estructuras de hormigón armado*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

- Pourbaix, M. (1974). *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Houston, Texas, USA: National association of corrosion engineers.
- Randles, J. (1947). Kinetics of rapid electrode reactions,. Discuss. Faraday Soc.
- Ramón Zamora, J. E. (2018). *Tesis doctoral. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Raupach, M. (1995). Chloroide induced macrocell corrosion of steel in concrete - theoretical background and practical consequences. *ElServier Science*, 329-338.
- UNE 112072. (2011). *Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*. AENOR.
- UNE 112083. (2010). *Medición del potencial libre de corrosión en estructuras de hormigón armado*. AENOR.
- UNE 12390-3. (2011). *Determinación de la resistencia a la compresión de probetas*. AENOR.
- UNE 83980. (2014). *Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón*. AENOR.
- UNE 83982. (2008). *Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido*. AENOR.
- UNE 83966. (2008). *Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad*. AENOR .
- UNE 112011. (2011). *Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. AENOR.
- UNE 83988-2. (2014). *Determinación de la resistividad eléctrica, método de las cuatro puntas*. AENOR.
- UNE 83988-1. (2008). *Determinación de la resistividad eléctrica, método directo*. AENOR.
- Universidad de Cantabria. (s.f.). *Deterioro de Materiales*. Sevilla: Universidad de Cantabria.
- Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C. A., Skoczlas, F., & Corvez, D. (2013). Durability of and Ultra high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) under progressive aging. *Cement and concrete research*, 13.
- Young-Shen , J., Wen Zhao, Min Zhou, Hui-rong, M., & Ping, Z. (2013). Corrosion current distribution of macrocell and microcell of steel bar in concrete exposed to chloride environments. En *Construction and building Materials* (págs. 104 - 110). Elsevier.

Zapata Mina, J. C., Mina Vasquez, L. E., Zapata Beltran, M. A., & Rojas Diaz, M. A. (12 de diciembre de 2015). *Universidad tecnológica de Pereira*. Obtenido de Metalografía: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>

