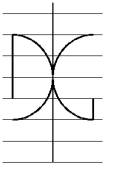




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil

Técnicas de monitorización de la corrosión y su aplicación
en estructuras nuevas y rehabilitadas: análisis de la
velocidad y potencial de corrosión.

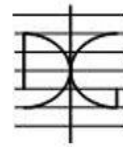
Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Florez Sanchez, Wendy Vanesa

Tutor/a: Calderón García, Pedro Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO ACADÉMICO 2023/2024

**Técnicas de monitorización de la corrosión y su
aplicación en estructuras nuevas y rehabilitadas:
análisis de la velocidad y potencial de corrosión.**

Autor/a: Wendy Vanesa Florez Sanchez

Tutor/a: Pedro A. Calderón García

Valencia, Marzo de 2024

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Agradecimientos

Primero que todo, gracias a Dios.

Quisiera expresar mi eterno agradecimiento a mi tutor Pedro Calderón, gracias por la confianza depositada para llevar a cabo este trabajo, la guía y paciencia han sido un pilar en el desarrollo de este trabajo.

Gracias a CalSens, la disposición al compartir información, resolución de inquietudes y gran ambiente en sus instalaciones fue muy importante para la culminación de este proyecto.

A mis amigos, que durante esta experiencia se convirtieron en familia a pesar de las barreras culturales.

Por último y lo más importante, gracias a mis padres y hermana por el apoyo brindado para culminar esta etapa lejos de casa.

Gracias a todos y cada una de las personas que me animaron a realizar un sueño que hoy es una realidad.

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Máster se aborda la corrosión en estructuras de hormigón armado, tanto en edificios nuevos como rehabilitados. La corrosión representa una amenaza para la durabilidad y seguridad de estas estructuras, lo que a menudo resulta en costosas intervenciones de reparación o reemplazo. Se explica que la corrosión puede ocurrir cuando la capa protectora de óxido en las armaduras se deteriora debido a la carbonatación del hormigón o la presencia de cloruros. Los efectos de la corrosión son generalmente imperceptibles hasta que el daño es significativo, lo que resalta la importancia de la detección temprana y el monitoreo continuo.

El trabajo se centra en el uso de sensores electroquímicos para medir la velocidad y el potencial de corrosión como parámetros clave para evaluar el estado de las estructuras. Se mencionan dos edificios específicos: un aparcamiento subterráneo rehabilitado en Plaza de la Reina de Valencia y el edificio de Distrito Digital del Puerto de Alicante, donde se han instalado sistemas de monitorización. El estudio destaca la importancia de los avances en tecnología de sensores para la detección temprana y el monitoreo continuo de la corrosión, lo que permite inspecciones no destructivas.

El trabajo tiene como objetivo general investigar y analizar las técnicas de monitorización de corrosión y su aplicabilidad en estructuras nuevas y rehabilitadas. Se presenta un estado del arte sobre el tema, se describe la monitorización en los dos edificios mencionados y se compara con normativas y recomendaciones existentes. Los resultados confirman la utilidad de esta técnica y proporcionan una base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas

Palabras clave: *Velocidad de corrosión, potencial de corrosión, hormigón armado, monitorización, fibra óptica.*

Summary

This master's Thesis addresses corrosion in reinforced concrete structures, both in new and rehabilitated buildings. Corrosion represents a threat to the durability and safety of these structures, often resulting in costly repair or replacement interventions. It is explained that corrosion can occur when the protective oxide layer on reinforcement deteriorates due to carbonation of the concrete or the presence of chlorides. The effects of corrosion are generally imperceptible until damage is significant, highlighting the importance of early detection and continuous monitoring.

The work focuses on the use of electrochemical sensors to measure corrosion rate and potential as key parameters to evaluate the state of structures. Two specific buildings are mentioned: a rehabilitated underground car park in Plaza de la Reina in Valencia and the Digital District building of the Port of Alicante, where monitoring systems have been installed. The study highlights the importance of advances in sensor technology for early detection and continuous monitoring of corrosion, enabling non-destructive inspections.

The general objective of the work is to investigate and analyze corrosion monitoring techniques and their applicability in new and rehabilitated structures. A state of the art on the subject is presented, the monitoring in the two mentioned buildings is described and compared with existing regulations and recommendations. The results confirm the usefulness of this technique and provide a basis for future research and practical applications.

Keywords: *Corrosion rate, corrosion potential, reinforced concrete, monitoring, fiber optics.*

Resum

En el present Treball de Fi de Màster s'aborda la corrosió en estructures de formigó armat, tant en edificis nous com rehabilitats. La corrosió representa una amenaça per a la durabilitat i seguretat d'estes estructures, la qual cosa sovint resulta en costoses intervencions de reparació o reemplaçament. S'explica que la corrosió pot ocórrer quan la capa protectora d'òxid en les armadures es deteriora a causa de la carbonatació del formigó o la presència de clorurs. Els efectes de la corrosió són generalment imperceptibles fins que el mal és significatiu, la qual cosa ressalta la importància de la detecció precoç i el monitoratge continu.

El treball se centra en l'ús de sensors electroquímics per a mesurar la velocitat i el potencial de corrosió com a paràmetres clau per a avaluar l'estat de les estructures. S'esmenten dos edificis específics: un aparcament subterrani rehabilitat en Plaza de la Reina de València i l'edifici de Districte Digital del Port d'Alacant, on s'han instal·lat sistemes de monitoratge. L'estudi destaca la importància dels avanços en tecnologia de sensors per a la detecció precoç i el monitoratge continu de la corrosió, la qual cosa permet inspeccions no destructives.

El treball té com a objectiu general investigar i analitzar les tècniques de monitoratge de corrosió i la seua aplicabilitat en estructures noves i rehabilitades. Es presenta un estat de l'art sobre el tema, es descriu el monitoratge en els dos edificis esmentats i es compara amb normatives i recomanacions existents. Els resultats confirmen la utilitat d'esta tècnica i proporcionen una base per a futures investigacions i aplicacions pràctiques

Paraules clau: *Velocitat de corrosió, potencial de corrosió, formigó armat, monitoratge, fibra òptica.*

Contenido

Capítulo 1. Introducción	15
1. Contexto.....	16
2. Antecedentes.....	18
3. Justificación.....	19
4. Objetivos	20
4.1. Objetivo general.....	20
4.2. Objetivos específicos.....	20
5. Estructura del documento.....	21
Capítulo 2. Estado del Arte	24
1. Historia	25
1.1. De hierro a acero	25
1.2. Hormigón armado	27
2. La corrosión: tipos de corrosión en estructuras.....	30
2.1. Corrosión del acero en estructuras de hormigón armado	30
2.2. Formas de corrosión en estructuras.....	33
2.2.1. Corrosión uniforme.....	35
2.2.2. Corrosión por picaduras o pitting.....	36
2.2.3. Corrosión galvánica	37
2.2.4. Corrosión por erosión.....	38
3. Parámetros para el seguimiento de la corrosión	38
4. Detección de corrosión en estructuras de hormigón armado	39
4.1. Inspección y ensayos.....	41
4.1.1. Métodos Destructivos.....	41
4.1.1.1. Extracción de testigos.....	41
4.1.1.2. calicatas	42
4.1.2. Métodos No Destructivos.....	43
4.1.2.1. Inspección visual.....	43
4.1.2.2. Pachometro.....	44
4.1.2.3. Ground penetrating radar (GPR).....	45
4.1.2.4. Gammagrafía o tomografía	46
4.1.2.5. Corrosímetro	46

4.2. Sensores	47
4.2.1. Sensores potenciométricos.....	47
4.2.2. Sensores electroquímicos.....	49
4.3. Límites establecidos.....	51
5. Casos de aplicación de sensores de corrosión a estructuras de hormigón	52
Capítulo 3. Casos prácticos	54
1. Plaza de la Reina.....	56
1.1. Introducción y descripción de la estructura.....	56
1.2. Plan de monitorización	68
1.3. Monitorización de parámetros de durabilidad	69
1.4. Monitorización del comportamiento estructural	74
1.5. Resultados	76
2. Edificio distrito digital de Alicante.....	93
2.1. Introducción y descripción de la estructura.....	93
2.2. Plan de monitorización	99
2.3. Monitorización parámetros de durabilidad	99
2.4. Monitorización del comportamiento estructural	103
2.5. Resultados	106
Capítulo 4. Conclusiones	116
Capítulo 5. Futuros desarrollos.....	120
Capítulo 6. Bibliografía	123

Lista de figuras

FIGURA 1. TENDENCIA DE LA PÉRDIDA DE CAPACIDAD PORTANTE DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON CORROSIÓN	17
FIGURA 2. DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO Y LAS POSIBLES INTERVENCIONES DE REFUERZO	17
FIGURA 3. IRON BRIDGE (1777)	26
FIGURA 4. CONVERTIDOR DE BESSEMER (1851).	27
FIGURA 5. BARCA DE HORMIGÓN ARMADO POR JOSEPH LAMBOT. (1848). RECUPERADO DE: APUNTES ASIGNATURA HISTORIA Y ESTÉTICA DEL HORMIGÓN, MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN.....	28
FIGURA 6. FRONTÓN RECOLETOS POR EDUARDO TORROJA. (1936).	29
FIGURA 7. CUBIERTA DEL HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA POR EL ING. EDUARDO TORROJA. (1941)	29
FIGURA 8. RED DE POROS EN UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO. (2016)	34
FIGURA 9. ESQUEMA DE CORROSIÓN SEGÚN LA APARIENCIA DEL METAL. (2016)	35
FIGURA 10. CORROSIÓN UNIFORME EN UNA COLUMNA DE HORMIGÓN ARMADO.	36
FIGURA 11. CORROSIÓN POR PICADURAS O PITTING EN EL ACERO. (2016). RECUPERADO DE: APUNTES ASIGNATURA PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN, “EFECTOS DEL AMBIENTE MARINO EN EDIFICIOS DE SEGUNDA RESIDENCIA”	37
FIGURA 12. CORROSIÓN GALVÁNICA (2020)	37
FIGURA 13. CORROSIÓN POR EROSIÓN EN ESTRUCTURA MARINA.	38
FIGURA 14. EXTRACCIÓN DE TESTIGOS.....	42
FIGURA 15. INSPECCIÓN VISUAL. (2021)	45
FIGURA 16. ESQUEMA DE MEDIDA DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN DE LA ARMADURA EMBEBIDA MEDIANTE SENSORES DE REFERENCIA CON SOLUCIÓN DE IONES CONOCIDA Y SUMERGIDA.	47
FIGURA 17. VALORES LÍMITES DE REFERENCIA DE POTENCIAL.	49
FIGURA 18. TEMPLAB	49
FIGURA 19. SENSOR ELECTROQUÍMICO DE TEMPERATURA, POTENCIAL Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	50
FIGURA 20. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN	52
FIGURA 21. LESIONES EVIDENCIADAS. FUENTE: (CALSENS)	56
FIGURA 22. EMPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EN GOOGLE MAPS. RECUPERADO DE URL: HTTPS://GOO.GL/MAPS/V59WN5LOXTKKUBYN8	57
FIGURA 23. VISTA EN PLANTA GENERAL DEL APARCAMIENTO	58
FIGURA 24. DETALLES DEL ARMADO DE FORJADO Y VIGAS DE LA PLANTA -1 DEL APARCAMIENTO	59
FIGURA 25. DETALLES DE SECCIÓN DE ARMADO DE FORJADO Y VIGAS DE LA PLANTA -2 DEL APARCAMIENTO	59
FIGURA 26. DETALLES DE SECCIÓN DE ARMADO DE PILARES Y MÉNSULAS DOBLES DE LAS PLANTAS -1 Y -2 DEL APARCAMIENTO	60
FIGURA 27. VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS ANTES DE LA REHABILITACIÓN.	61
FIGURA 28. VALORES OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN TESTIGOS ANTES DE LA REHABILITACIÓN.	62
FIGURA 29. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN SÓTANO -1	63
FIGURA 30. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN SÓTANO -2	63
FIGURA 31. POTENCIAL DE CORROSIÓN MEDIDO EN ELEMENTOS ANTES DE LA REHABILITACIÓN.	64
FIGURA 32. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN PLANTA SÓTANO -1	65
FIGURA 33. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN PLANTA SÓTANO -2.....	65
FIGURA 34. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	67
FIGURA 35. RECRECIDO PARA PILARES EN PLANTA INFERIOR. FUENTE: ANEJO DE REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE LA PLAZA DE LA REINA	68
FIGURA 36. LOCALIZACIÓN DE LOS SENSORES. ARRIBA -1 Y ABAJO -2	70
FIGURA 37. LEYENDA DE SENSORES Y CABLEADO DE CROQUIS	70
FIGURA 38. LOCALIZACIÓN DE SENSOR DE CORROSIÓN EN FORJADO, VIGA Y PILAR	73

FIGURA 39. SENSOR INSTALADO EN ELEMENTO	74
FIGURA 40. SENSOR DE DEFORMACIÓN LONG- GAUGE EMPLAZADO	76
FIGURA 41. VALORES INICIALES DE POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LOS ELEMENTOS MONITORIZADOS	77
FIGURA 42. SENSOR INSTALADO EN PILAR EN LA PLANTA -2 ZONA A	78
FIGURA 43. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-1A	78
FIGURA 44. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-1B, V-1B, F-1B	79
FIGURA 45. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-1C, V-1C, F-1C	80
FIGURA 46. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-1D, V-1D, F-1D	80
FIGURA 47. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-2 ^a	81
FIGURA 48. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-2B, V-2B, F-2B	81
FIGURA 49. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-2C, V-2C, F-2C	82
FIGURA 50. POTENCIAL DE CORROSIÓN P-2D, V-2D, F-2D	83
FIGURA 51. TEMPERATURAS OBTENIDAS PARA ELEMENTOS MONITORIZADOS PARA POTENCIAL DE CORROSIÓN	84
FIGURA 52. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-1 ^a	84
FIGURA 53. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-1B, V-1B, F-1B	85
FIGURA 54. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-1C, V-1C, F-1C	86
FIGURA 55. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-1D, V-1D, F-1D	86
FIGURA 56. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-2A	87
FIGURA 57. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-2B, V-2B, F-2B	87
FIGURA 58. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-2C, V-2C, F-2C	88
FIGURA 59. VELOCIDAD DE CORROSIÓN P-2D, V-2D, F-2D	89
FIGURA 60. TEMPERATURAS OBTENIDAS PARA ELEMENTOS MONITORIZADOS	90
FIGURA 61. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA VS VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN P-1 ^a	91
FIGURA 62. DIAGRAMA DE EVANS POTENCIAL DE CORROSIÓN VS VELOCIDAD DE CORROSIÓN, 10 ABRIL ...	91
FIGURA 63. DIAGRAMA DE EVANS POTENCIAL DE CORROSIÓN VS VELOCIDAD DE CORROSIÓN, 19 JUNIO ..	92
FIGURA 64. DIAGRAMA DE EVANS POTENCIAL DE CORROSIÓN VS VELOCIDAD DE CORROSIÓN, 24 JULIO ...	92
FIGURA 65. EMPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EN GOOGLE MAPS	93
FIGURA 66. SECCIÓN TIPO DE LA EDIFICACIÓN	94
FIGURA 67. PLANTAS DE USO DEL EDIFICIO, A. CUBIERTA, B. PLANTA 2 ^a RESPECTIVAMENTE	95
FIGURA 68. PLANTAS DE USO DEL EDIFICIO, A. PLANTA 1 ^a B. PLANTA -1 ^a RESPECTIVAMENTE	95
FIGURA 69. GEOMETRÍA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN FASE 1	96
FIGURA 70. GEOMETRÍA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN FASE 2	96
FIGURA 71. GEOMETRÍA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN FASE 3	97
FIGURA 72. GEOMETRÍA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN FASE 4	97
FIGURA 73. GEOMETRÍA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN FASE 5	98
FIGURA 74. DETALLES DE ARMADO DE MUROS TIPO DEL APARCAMIENTO Y VIGA BORDE DE CANTIL.	98
FIGURA 75. INSTALACIÓN DE SENSOR DE CORROSIÓN EN MURO	100
FIGURA 76. DETALLE EN ALZADO DE ZONAS MONITORIZADAS EN EL APARCAMIENTO	101
FIGURA 77. DETALLE EN PLANTA DE LAS ZONAS MONITORIZADAS EN EL APARCAMIENTO	101
FIGURA 78. SENSORES LONG-GAUGE INSTALADOS EN LA ESTRUCTURA.	103
FIGURA 79. LOCALIZACIÓN DE SENSORES LONG-GAUGE Y DE TEMPERATURA PARA MONITORIZAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	105
FIGURA 80. LOCALIZACIÓN SENSORES PARA MONITORIZAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL ZONA C	106
FIGURA 81. LEYENDA DE SENSORES	106
FIGURA 82. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN L01 Y L02	107
FIGURA 83. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN L03 Y L04	107
FIGURA 84. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M01 Y M02	107
FIGURA 85. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M03 Y M04	108
FIGURA 86. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M05 Y M06	108
FIGURA 87. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M07 Y M08	108

FIGURA 88. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M09 Y M10.....	109
FIGURA 89. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN M11 Y M12.....	109
FIGURA 90. POTENCIAL DE CORROSIÓN EN P01 Y P02.....	109
FIGURA 91. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN L01 Y L02.....	110
FIGURA 92. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN L03 Y L04.....	110
FIGURA 93. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M01 Y M02.....	110
FIGURA 94. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M03 Y M04.....	111
FIGURA 95. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M05 Y M06.....	111
FIGURA 96. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M07 Y M08.....	111
FIGURA 97. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M09 Y M10.....	112
FIGURA 98. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN M11 Y M12.....	112
FIGURA 99. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN P01 Y P02.....	112
FIGURA 100. TEMPERATURA TOMADA EN ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA.....	113
FIGURA 101. EVOLUCIÓN DE TEMPERATURA VS ICORR EN L01.....	114
FIGURA 102. DIAGRAMA EVANS REPRESENTANDO VALORES DE VELOCIDAD Y POTENCIAL DE CORROSIÓN DE LOS ELEMENTOS MONITORIZADOS.....	114
FIGURA 103. DIAGRAMA EVANS REPRESENTANDO VALORES DE VELOCIDAD Y POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LAS LOSAS.....	115

Capítulo 1. Introducción

1. Contexto

La corrosión es un ataque que se genera al metal mediante una reacción química o electroquímica con el ambiente en el que se encuentra. Las condiciones que dan paso a la corrosión en estructuras de hormigón armado son bien conocidas hoy en día. A pesar de esto, la corrosión afecta a muchas estructuras, poniendo en riesgo su seguridad y longevidad, lo que a menudo requiere costosas intervenciones de reparación, refuerzo e incluso demolición

El hormigón armado es usualmente empleado en la construcción de estructuras como puentes, edificios, plataformas marinas, estructuras subterráneas como túneles o tuberías de hormigón subterráneas. En general, el hormigón armado es un material muy durable y capaz de soportar condiciones ambientales extremas. La armadura del hormigón armado se encuentra en condiciones pasivas, es decir, está protegida por una capa de óxido la cual se da gracias a la alcalinidad del hormigón. La corrosión puede dar inicio solo cuando esta capa se destruye, lo cual puede darse de dos formas: por carbonatación del hormigón, la cual afecta el pH del cemento desprotegiendo la armadura frente a la corrosión; y por la presencia de cloruros en la superficie del acero que pueden llegar a penetrar la estructura desde el exterior.

Los efectos de la corrosión en la vida cotidiana son muchos y la mayoría de estos pasan de manera desapercibida ante los ojos humanos hasta el punto de solo notarlos cuando ya el daño es grande. Por ejemplo, encontrar elementos corroídos en el hogar como tuberías, puertas y/o elementos dentro de la misma construcción/estructura es bastante probable o en el camino a un sitio podemos evidenciar daños por corrosión en puentes vehiculares, postes de luz de hormigón armado, etc. Sin embargo, es posible actuar sobre este proceso, mejorando el mantenimiento y la conservación de la estructura y aumentando su vida útil, siempre que se detecte su acción con suficiente antelación (Figura 2). Por esta razón desde un punto de vista social, se ha asumido que la corrosión es una patología que genera daños inevitables que tarde o temprano sufrirá cualquier elemento metálico

que se encuentre expuesto. Por esta razón se han desarrollado diferentes técnicas y dispositivos para detectar esta patología a una edad temprana.

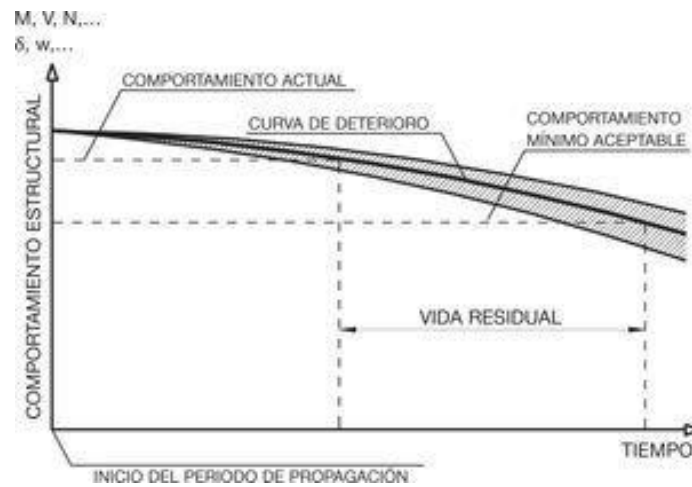


Figura 1. Tendencia de la pérdida de capacidad portante de estructuras de hormigón armado con corrosión [1]

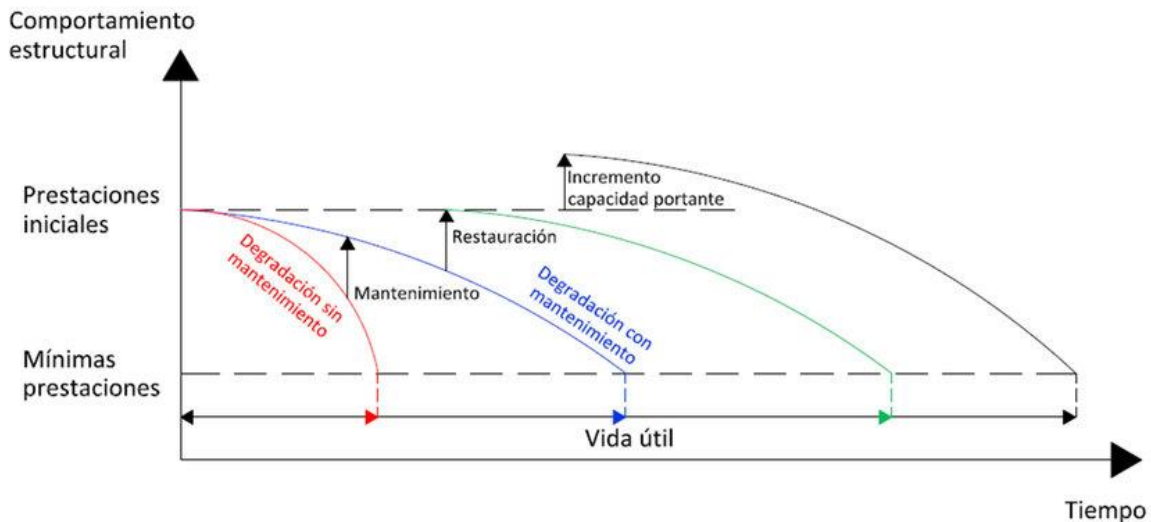


Figura 2. Diagrama del comportamiento estructural de los elementos de hormigón armado y las posibles intervenciones de refuerzo [2]

En este trabajo, se pretende exponer aquellos dispositivos y técnicas comerciales desarrolladas a lo largo del tiempo y su aplicación a dos edificios con estructura de hormigón armado en los que se han instalado sistemas de monitorización para la corrosión, estos son el aparcamiento subterráneo de la Plaza de la Reina de

Valencia y el edificio de Distrito Digital del Puerto de Alicante. El primero corresponde a una obra rehabilitada de una estructura de hormigón armado construida en el año 1968 y cuya rehabilitación se llevó a cabo en el 2022; la estructura se encontraba deteriorada por efecto de la corrosión en sus armaduras, por lo que su rehabilitación se basó en recrecidos de hormigón armado, previo saneado y limpieza del hormigón deteriorado y de las armaduras que se encontraban más oxidadas. El segundo edificio corresponde a un edificio de nueva construcción el cual se ubica en el puerto de Alicante, con una cimentación y muros a cotas por debajo del nivel del mar, lo que lo expone al contacto con un nivel freático salino. Ambos trabajos han sido ejecutados por la empresa Calculo y Estructuras Sensadas SL (CALSENS SL) en el que la autora ha desarrollado un contrato de prácticas.

2. Antecedentes

En los últimos años, se ha llevado a cabo una amplia investigación en el campo de la monitorización del avance de la corrosión en hormigón armado mediante el empleo de sensores de corrosión. Esta área de estudio ha sido abordada por diversos investigadores con el objetivo de mejorar la detección temprana y el monitoreo continuo de la corrosión en estructuras armadas. A continuación, se presentan algunos de estos trabajos publicados en los últimos 5 años y que han contribuido significativamente a este campo y a la realización de este documento.

El investigador Gandía Romero^[3] en su trabajo doctoral titulado “*Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión de estructuras de hormigón armado*” se centró en un nuevo modelo de medida de la resistividad de hormigones que permitiera valorar la probabilidad que tenían los elementos como armaduras de tener corrosión.

Ramón Zamora^[4], en su trabajo final de máster “*Caracterización de sensores para la alerta temprana de procesos de corrosión en hormigón armado*” se planteó como objetivo el determinar y evaluar las posibilidades de emplear el hierro como un

electrodo de trabajo de un sensor de corrosión para estructuras de hormigón armado.

Lliso^[5], en su trabajo titulado *“Monitorización de la durabilidad de estructuras existentes de hormigón armado mediante la inserción de una red de sensores”* se toma como objetivo principal el optimizar un sistema de monitorización de corrosión desarrollado y patentado por la UPV el cual emplea sensores.

En la publicación titulada *“Sensores para el monitoreo de corrosión en hormigón armado: desarrollo y aplicabilidad”* ^[6] se tuvo como objetivo claro la descripción de sensores de corrosión desarrollados en la actualidad, además de explicar su funcionamiento y aplicabilidad como instrumentos de monitorización e investigación.

Estos trabajos junto con otros avances recientes en el campo de la monitorización de la corrosión han contribuido significativamente a mejorar la detección temprana y el monitoreo continuo de las estructuras. Estos avances son fundamentales para garantizar la durabilidad y la vida útil de las estructuras y para optimizar las estrategias al momento de realizar mantenimiento y rehabilitación.

3. Justificación

La realización del presente Trabajo Final de Máster basado en la monitorización de corrosión en estructuras nuevas y rehabilitadas se justifica por diversas razones. Primeramente, es fundamental garantizar la durabilidad de las estructuras y la corrosión es uno de los principales factores que amenaza su vida útil. La detección temprana y la monitorización de los agentes corrosivos son cruciales para lograr un rendimiento óptimo a futuro. Además, la corrosión puede llegar a tener un impacto significativo en los costos de mantenimiento y reparación de las estructuras, lo que resalta la importancia de una toma de medidas preventivas y correctivas anticipadamente.

En segundo lugar, los avances que se han logrado en la tecnología de sensores han permitido el desarrollo de dispositivos más sofisticados para la detección de

esta patología. Estos sensores dan la posibilidad de realizar una monitorización en continuo y en tiempo real de la estructura para así lograr analizar y controlar el avance de la corrosión, proporcionándonos además datos importantes para la toma de decisiones. Así mismo, el emplear estos sensores nos permite realizar inspecciones de forma no destructiva, lo cual es especialmente importante a la hora de tratarse no solo de estructuras nuevas sino también de estructuras rehabilitadas donde se busca evitar generar daños adicionales que perjudiquen la salud estructural de la edificación/elemento.

Finalmente, el llevar a cabo este trabajo se busca contribuir al conocimiento científico y tecnológico en el área de la corrosión en estructuras de hormigón armado. Los resultados obtenidos pueden llegar a ser de interés para la comunidad académica y profesional, sirviendo, así como una base para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas.

4. Objetivos

4.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es investigar y analizar las técnicas existentes para la monitorización de la corrosión y su aplicabilidad en estructuras nuevas y rehabilitadas. Se centra en el uso de sensores electroquímicos para medir la corrosión y se enfoca específicamente en la velocidad y el potencial de corrosión como parámetros clave para la evaluación del estado de las estructuras.

4.2. Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía existente sobre la monitorización de la corrosión de armaduras en estructuras de hormigón, resumiéndola y analizándola en un estado del arte relativo a esta cuestión.
- Presentar y comentar el diseño y seguimiento de la monitorización de corrosión en obras nuevas y rehabilitadas en las que se han instalado sensores en localizaciones puntuales y de mayor riesgo de corrosión.

- Comparar los resultados obtenidos de la monitorización de los casos con las recomendaciones y estándares existentes en la literatura técnica, normas, etc. Se buscará determinar si los valores de velocidad y potencial de corrosión se encuentran dentro de los límites aceptables y si se requieren acciones adicionales.
- Analizar la relación entre la velocidad y potencial de corrosión.
- Presentar conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

5. Estructura del documento

El presente trabajo final de Máster se estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Introducción
- Capítulo 2. Estado del Arte
- Capítulo 3. Casos Prácticos
- Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones
- Capítulo 5. Futuros desarrollos
- Capítulo 6. Bibliografía

En el Capítulo 1 se justifica la realización del presente trabajo Final de Máster, donde se expone de forma general sin necesidad de una profunda investigación la importancia del empleo de los sensores de corrosión para la prevención temprana de corrosión en elementos de hormigón armado.

En el Capítulo 2 se expone, a partir de una investigación bibliográfica, el estado del arte relativo al tema planteado. En la primera parte se evidencia una pequeña introducción sobre la historia de los elementos de acero y hormigón. Seguidamente, se procede con los fundamentos de la corrosión, de qué manera se produce, las diferentes maneras en las que se puede llegar a ver en estructuras de hormigón armado, etc. Para finalizar el capítulo, se explica la corrosión del acero en el hormigón y los distintos métodos que existen actualmente para detectarla.

Pasando al Capítulo 3, se encuentra el apartado de casos prácticos, se inicia con la introducción de las dos obras monitorizadas actualmente que cuentan con un sistema de monitorización de corrosión en continuo. Seguidamente, se da información a detalle de cada estructura monitorizada y finalmente se llega a los resultados donde se discutirán y explicarán aquellos datos recopilados.

En el capítulo 4, se presentan las conclusiones derivadas de la revisión bibliográfica y los casos prácticos. Se resume de manera concisa los hallazgos más destacados y se evalúa la efectividad de los métodos de detección de corrosión utilizados. Además, se discuten las implicaciones prácticas y teóricas de los resultados, proporcionando recomendaciones específicas para profesionales y posibles áreas de investigación futura. Este capítulo busca consolidar y dar sentido a la información presentada en el trabajo, ofreciendo una visión integral de los logros y contribuciones a la prevención temprana de la corrosión en elementos de hormigón armado.

En el capítulo 5, se explorarán las posibles direcciones futuras que podrían tomarse en relación con el empleo de sensores de corrosión y la prevención temprana de la corrosión en elementos de hormigón armado. Se considerarán avances tecnológicos, investigaciones en curso y áreas de mejora identificadas durante la realización del presente trabajo. Además, se discutirán posibles aplicaciones innovadoras de la monitorización de corrosión, así como la integración de nuevas tecnologías que puedan mejorar la eficacia y la precisión de los sistemas existentes. Este capítulo proporcionará una visión prospectiva del campo, sirviendo como punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de la prevención de la corrosión en estructuras de hormigón armado.

Para finalizar, el capítulo 6 presenta la bibliografía empleada y consultada durante la elaboración del presente trabajo. Se incluirán referencias bibliográficas de libros, artículos científicos, informes técnicos y cualquier otra fuente relevante que haya contribuido a la fundamentación teórica y metodológica del estudio. Este capítulo proporcionará a los lectores una fuente completa y detallada de las fuentes

utilizadas, permitiendo una verificación y ampliación del conocimiento presentado en los capítulos anteriores.

Capítulo 2. Estado del Arte

1. Historia

1.1. DE HIERRO A ACERO

El hierro, elemento fundamental para formar acero, es un elemento químico denominado “*ferrum*” en latín. Este elemento, no es solo uno de los elementos más importantes debido a su gran abundancia en el planeta, sino que también conforma una parte importante (70%) del núcleo de la tierra.

No se conoce a ciencia cierta quien fue el autor del descubrimiento del hierro, puesto que los primeros indicios de su uso se remontan a 3.500 años a. C por parte de los sumerios y los egipcios ^[7] . En la antigüedad, los egipcios extraían este elemento de los meteoritos provenientes del espacio, es por eso por lo que se consideró un elemento relativamente extraño como lo era el oro en la época.

Durante la revolución industrial, el hierro se llegó a reconocer como un material de construcción, por ende, la demanda de este se incrementó. La explotación masiva del material llevo un decrecimiento de precio, por lo que se comenzó a emplear también para uso doméstico.

El hierro fundido, se empleó exitosamente en estructuras a lo largo del siglo XVIII como lo fue el conocido Puente de Hierro (*Figura 3*) construido por Thomas Farnoll Pritchard en Coalbrookdale, ciudad de Inglaterra. Este puente se hizo famoso al ser el primer puente arco fabricado totalmente con hierro fundido durante la Revolución industrial.



Figura 3. Iron Bridge (1777) ^[8]

Seguidamente, se implementó el hierro forjado al rojo, dando así la posibilidad de dar la forma esperada únicamente martilleando el elemento al rojo y endureciéndolo mediante el método de enfriarlo rápidamente. Una de las obras más emblemáticas construidas en hierro es la Torre Eiffel. En España, el hierro se empleó en primera instancia en estaciones de ferrocarril. Un gran ejemplo es la estación de Atocha, la cual posee una cubierta de hierro y cristal.

El acero no es considerado un metal, debido a que para lograr conseguir este se debe seguir un proceso de aleación. La historia de cómo surgió el acero se remonta al siglo XIX, cuando Henry Bessemer perfeccionó la producción de hierro convirtiéndolo en acero mediante un proceso de bajo costo que él mismo diseñó y patentó. Este proceso se basaba en soplar aire a presión en el fondo de una cuchara donde se colocaba el hierro líquido conocido también como arrabio (*Figura 4*).

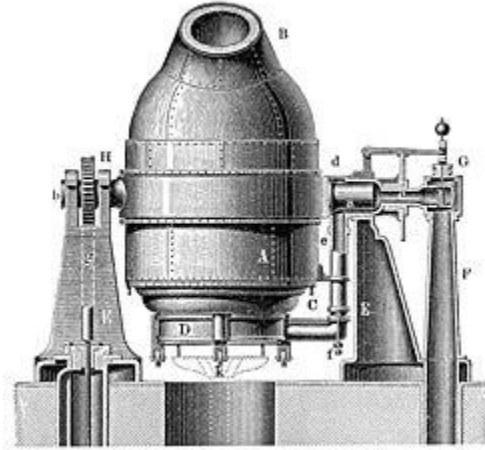


Figura 4. Convertidor de Bessemer (1851).^[9]

Este método era capaz de eliminar las impurezas del hierro debido al proceso que conllevaba la oxidación del aire, dando como resultado un acero más resistente de manera rápida. El impacto que tuvo el método de Bessemer fue bastante grande, dando paso así al planteamiento de construcciones más grandes.

1.2. HORMIGÓN ARMADO

La historia del concreto u hormigón se encuentra relacionada con los periodos históricos y las civilizaciones que habitaron alguna vez el planeta, las cuales emplearon este material y lo perfeccionaron a lo largo de los años hasta llegar a lo que hoy en día conocemos como hormigón.

La palabra *hormigón* proviene de vocablos franceses y alemanes: “béton” y “beton” respectivamente, los cuales son derivados del latín “bitumen/bituminis” que tiene como significado “lodo que se iba espesando”^[10]. Se conoce que muchas civilizaciones de la antigua Europa como los egipcios, romanos, entre otras empleaban hormigones rudimentarios para construcción de templos, chozas, casas, etc. En la población de Lepenski Vir, actualmente Serbia, se conoce gracias a los hallazgos que una de las poblaciones más antiguas de Europa empleaba un solado rojo para el suelo de sus chozas, este se componía de arena, restos de animales (huesos) y cal.

Tras la caída del imperio romano, el hormigón como material de construcción se vio en caída libre y muchos de los conocimientos adquiridos por esta civilización se dieron por perdidos. Siglos después, durante la edad media y la época del renacimiento, el hormigón no se empleó de la manera esperada, siendo así por el siglo XII que se comenzó a emplear nuevamente gracias a una mejora en la calcinación de la cal. Seguidamente de esto, se comenzaron a descubrir muros de grandes dimensiones y pesados construidos por los romanos, quienes fueron los pioneros en implementar barras y láminas de bronce a sus estructuras.

Del hormigón armado, se conoce que la primera persona en diseñar y patentar un elemento de *hormigón armado* fue Joseph Lambot en 1848, mediante su creación de una barca de hormigón armado. (Figura 5)



Figura 5. Barca de hormigón armado por Joseph Lambot. (1848). Recuperado de: Apuntes asignatura Historia y estética del Hormigón, Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón.^[11]

En 1920, el hormigón armado se encontraba completamente implementado en España, siendo empleado en importantes construcciones por parte de grandes ingenieros y arquitectos a lo largo de todo el país. Eduardo Torroja se conoce como uno de los más afamados ingenieros que emplearon este material en obras de gran complejidad estructural como el Mercado de Algeciras, el Frontón de recoletos y

una de las obras más reconocidas a nivel ingenieril, la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela en Madrid.



Figura 6. Frontón Recoletos por Eduardo Torroja. (1936).^[12]

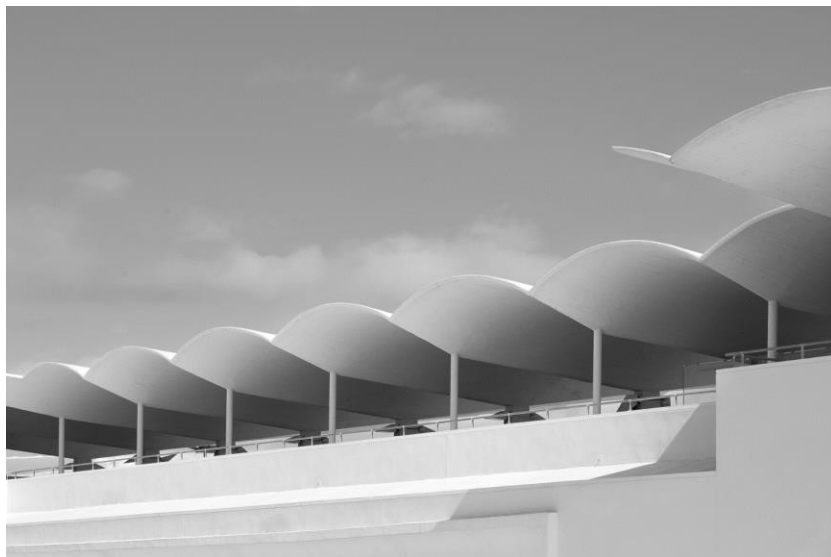


Figura 7. Cubierta del Hipódromo de la Zarzuela por el Ing. Eduardo Torroja. (1941)^[13]

2. La corrosión: tipos de corrosión en estructuras

2.1. CORROSIÓN DEL ACERO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

La durabilidad de las estructuras depende del ambiente al que se encuentren expuestas, esto quiere decir que cuanto más agresivo sea, mayor posibilidad de corrosión habrá. El deterioro de las estructuras de hormigón armado se atribuye mayormente a los fenómenos producidos por la corrosión llegando a afectar no solo de manera directa sino también indirecta debido a los costos que conlleva su reparación.

El estudio de la durabilidad de estructuras de hormigón armado ha tenido mayor notabilidad a lo largo de los años en las normativas de todos los países, debido a que gran parte de los colapsos se atribuye a la corrosión en armaduras que han sido poco o casi nada tratadas, dando lugar a un elevado coste económico de reparación. Según estudios realizados, el impacto económico de la corrosión en metales se estima en aproximadamente el 6% del PIB a nivel mundial, el cual se divide en un 3% de costos directos y el porcentaje restante de costos indirectos. Comités de expertos en corrosión y protección contra la corrosión estiman que las pérdidas anuales generadas por esta patología representan aproximadamente el 3.5% del producto interno bruto de un país.^[14]

Desde el punto de vista normativo, se han implementado diversas características que se deben de cumplir para garantizar la seguridad de la estructura. Muchos de estos límites son la porosidad del material (hormigón), el espesor de recubrimiento mínimo, el tamaño de fisuras permitido, entre otros, todo esto dependiendo directamente del ambiente al que se va a exponer. Los requisitos establecidos por la normativa UNE-EN 1992-1-1:2011 ^[15] en el capítulo 9 denominado “Durabilidad de las estructuras de hormigón”, así como el Código estructural^[16], exponen que se debe de tener en cuenta la calidad del hormigón, buscando siempre una calidad adecuada donde se cumplan ciertos aspectos como:

- Fabricación con materiales adecuados.

- Dosificación adecuada.
- Puesta en obra correcta.
- Curado del hormigón.
- Resistencia mecánica acorde al comportamiento estructural esperado.
- Recubrimientos correspondientes a las clases de exposición.
- Mínima apertura de fisura de acuerdo con su clase de exposición.
- Entre otras expuestas en las normas mencionadas anteriormente.

En función de la clase de exposición a la que se exponga la estructura, la dosificación a/c del hormigón deberá cumplir los requisitos expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de dosificación máxima con relación a/c. Recuperado de: UNE-EN-1992-1-1: 2011. [15]

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición																				
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
Máxima relación agua/cemento	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	275	300	275	300	275	300	325	300	300	300
	Armado	250	275	275	300	300	300	325	350	325	325	325	300	325	300	325	325	350	350	325	325	325
	Pretensado	275	300	300	300	300	300	325	350	325	325	325	300	325	300	325	325	350	350	325	325	325

Las clases de exposición se dividen en siete grupos:

- Sin riesgo de ataque por corrosión
- Corrosión inducida por carbonatación
- Corrosión inducida por cloruros de origen no marino
- Corrosión inducida por cloruros de origen marino
- Ataque hielo/deshielo
- Ataque químico
- Erosión

Tabla 2. Designación de las clases de exposición. Recuperado de: UNE-EN-1992-1-1: 2011 [15]

Designación de la clase	Descripción del entorno
Sin riesgo de ataque por corrosión	
X0	Para hormigones en masa.

Corrosión inducida por carbonatación	
XC1	Seco o permanentemente húmedo.
XC2	Húmedo, raramente seco.
XC3	Humedad moderada.
XC4	Sequedad y humedad cíclica.
Corrosión inducida por cloruros de origen no marino	
XD1	Humedad moderada.
XD2	Húmedo, raramente seco.
XD3	Ciclos de humedad y secado.
Corrosión inducida por cloruros de origen marino	
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, pero no en contacto directo con el agua del mar.
XS2	Permanentemente sumergida en agua de mar.
XS3	Zona de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras.
Ataque hielo/deshielo	
XF1	Saturación moderada, con sales fundentes.
XF2	Saturación alta, sin sales fundentes.
XF3	Saturación alta con sales fundentes o agua de mar.
Ataque químico	
XA1	Ambiente de una débil agresividad química.
XA2	Ambiente de una moderada agresividad química.
XA3	Ambiente de una alta agresividad química.

Erosión	
XM1	Elementos sometidos a erosión/abrasión moderada.
XM2	Elementos sometidos a erosión/abrasión intensa.
XM3	Elementos sometidos a erosión/abrasión extrema.

2.2. FORMAS DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS

El proceso de corrosión se conoce como un fenómeno electroquímico el cual causa un deterioro al material afectado. Este fenómeno se presenta cuando el material entra en contacto con el oxígeno y la humedad provocando así una reacción desencadenante.

Este proceso en las armaduras embebidas en hormigón es un fenómeno complejo que puede traer consigo consecuencias para la durabilidad y la integridad de la estructura. La corrosión inicia cuando los agentes corrosivos, como iones de cloruro, logran penetrar en el hormigón a través de sus poros y/o fisuras. Una vez entran en contacto con el acero/hierro, los iones de cloruro pueden romper la capa pasiva de oxido que normalmente protege el acero de la corrosión.

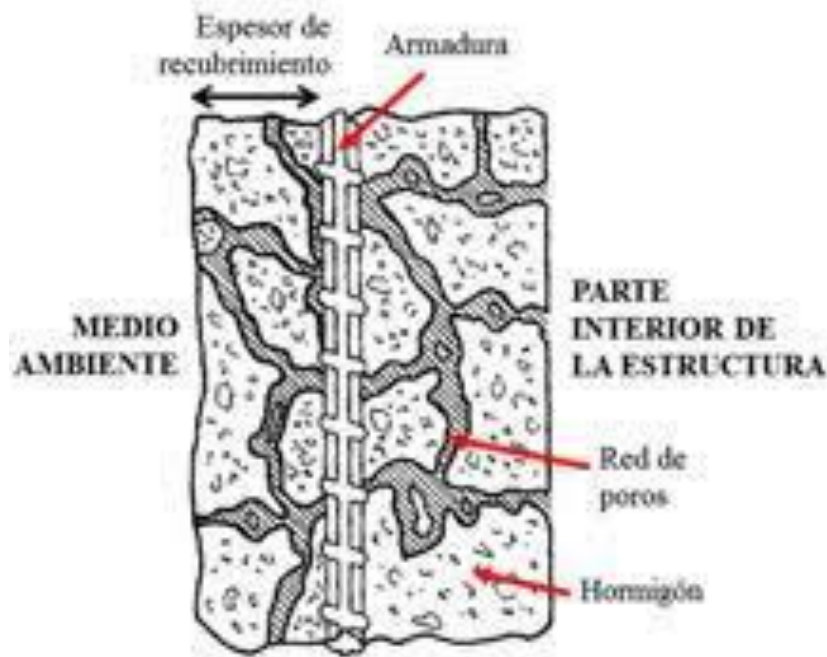


Figura 8. Red de poros en una estructura de hormigón armado. (2016)^[17]

La corrosión en armaduras generalmente se produce por vía humedad. Este es el escenario más común para este tipo de corrosión, debido a que los iones de cloruro provienen de fuentes externas como la exposición a ambientes marinos o el uso de sales de deshielo de carreteras, penetrando en el hormigón por sus poros y facilitando así el proceso. Por otro lado, existe la vía seca de corrosión, mejor conocida como corrosión atmosférica la cual se da en ambientes secos o de baja humedad, donde normalmente la corrosión es provocada por gases o vapores corrosivos presentes en el aire^[18]

Las formas en las que se presenta la corrosión se producen de manera espontánea y a la misma vez, tal y como se ha mencionado anteriormente, esto depende del ambiente al que se expone. Inicialmente, cuando la corrosión es baja no es apreciable a simple vista, pero cuando se encuentra en un punto crítico se llega a apreciar el deterioro mediante la aparición de fisuras o grietas, manchas y/o desprendimiento del hormigón debido a la reducción de espesores del acero.

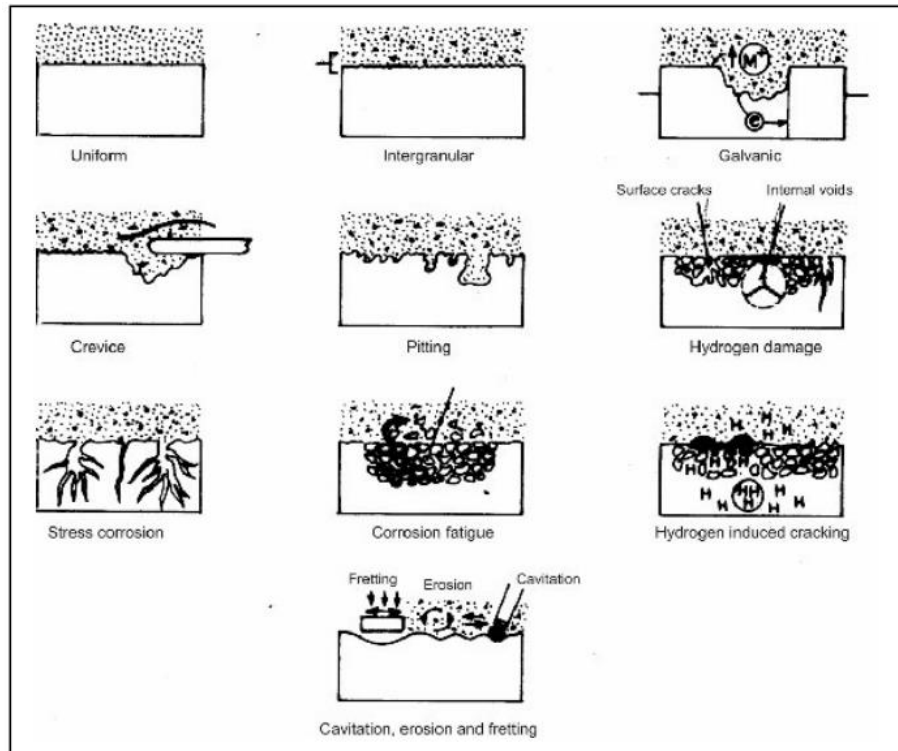


Figura 9. Esquema de corrosión según la apariencia del metal. (2016) [19]

2.2.1. Corrosión uniforme

La corrosión uniforme es una de las formas más comunes en las que se presenta la corrosión en estructuras armadas. Este tipo de corrosión puede darse cuando los refuerzos del hormigón se encuentran expuestos a ambientes corrosivos como lo son el agua salada o el aire muy húmedo, generando así la oxidación del refuerzo y provocando una pérdida de sección importante.

Este tipo de corrosión puede llegar a ser difícil de detectar ya que ocurre de manera gradual afectando grandes áreas de refuerzo, sin embargo, existen señales útiles como la aparición de fisuras en el hormigón que cubre la armadura, la descamación o pérdida de la capa protectora del hormigón y el abultamiento o expansión de la zona.



Figura 10. Corrosión uniforme en una columna de hormigón armado.^[20]

2.2.2. Corrosión por picaduras o pitting

Es un tipo de corrosión donde se localizan pequeñas *picaduras* cuando una pequeña área se ve expuesta a ambientes corrosivos dando paso a que se genera una corrosión localizada en la zona generando pequeños huecos en la capa protectora de la superficie del elemento (acero).

El pitting se puede producir debido a la falta de protección adecuada en el acero de refuerzo esto gracias a una insuficiente cobertura de hormigón, una exposición prolongada a ambientes corrosivos (sal marina, aire húmedo, etc.) o la más común: la falta de un adecuado mantenimiento y reparación de la estructura.



Figura 11. Corrosión por picaduras o pitting en el acero. (2016). Recuperado de: Apuntes asignatura Patología y Rehabilitación, “Efectos del ambiente marino en edificios de segunda residencia”^[21]

2.2.3. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica se presenta cuando dos metales diferentes entran en contacto generando una diferencia de potencial eléctrico el cual permite el flujo de electrones. El metal activo, que es el que posee más potencial positivo, inicia el proceso de corrosión mientras que el más noble no sufre corrosión alguna provocando así una pérdida significativa de sección y debilitando el acero.



Figura 12. Corrosión galvánica (2020) ^[22]

2.2.4. Corrosión por erosión

Puede llegar a ocurrir cuando la superficie del hormigón y el acero se ven expuestos a una combinación de agentes corrosivos y fuerzas mecánicas como la abrasión o el impacto. Lo anteriormente mencionado, provoca la pérdida de sección generando un aspecto físico irregular y áspero además de debilitar la estructura.



Figura 13. Corrosión por erosión en estructura marina. [23]

3. Parámetros para el seguimiento de la corrosión

La corrosión es un proceso químico inevitable en las estructuras de hormigón armado, donde el acero de refuerzo, un componente esencial, se deteriora con el tiempo debido a su interacción con el entorno. En la monitorización y prevención de este fenómeno, se emplean conceptos fundamentales como el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. El potencial de corrosión refleja la tendencia de un metal, en este caso, el acero, a corroerse en un ambiente específico. Por otro lado, la velocidad de corrosión cuantifica la rapidez con la que se está produciendo este proceso de degradación.

Una herramienta valiosa en la evaluación de la corrosión es el diagrama de Evans, que combina el potencial y la velocidad de corrosión. Este diagrama proporciona una representación gráfica que permite interpretar de manera visual la probabilidad de corrosión en función de las condiciones específicas del lugar. Al emplear estos

conceptos y herramientas, los ingenieros y profesionales de la construcción pueden anticipar y mitigar los efectos de la corrosión en las estructuras de hormigón armado.

La importancia de utilizar estos enfoques radica en la necesidad de asegurar la durabilidad y seguridad a largo plazo de las construcciones. La corrosión puede debilitar estructuras, reducir su vida útil y aumentar los costos de mantenimiento y reparación. Por lo tanto, comprender y controlar el proceso de corrosión es esencial para garantizar la integridad de las infraestructuras y promover su sostenibilidad a lo largo del tiempo.

- Velocidad de corrosión: La velocidad de corrosión (I_{corr}) se refiere a la tasa a la cual un material, generalmente un metal, se descompone o deteriora debido a reacciones químicas con su entorno, lo que conduce a la formación de agentes corrosivos. Se expresa en A/m^2 , $\mu A/cm^2$, etc.
- Potencial de corrosión: El potencial de corrosión (E_{corr}) es una técnica que proporciona información sobre el estado de pasivación de las armaduras y la probabilidad que tienen estas de corroerse. El E_{corr} nos permite generar mapas de potencial los cuales identifican aquellas zonas que pueden ser más propensas a presentar fenómenos de corrosión. [24]
- Diagrama de Evans: Un diagrama de Evans es un gráfico empleado en la evaluación de la actividad corrosiva y el comportamiento electroquímico de materiales metálicos expuestos a ambientes corrosivos. Su propósito principal radica en representar gráficamente la relación existente entre el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) de un metal en un contexto ambiental específico. Dicha representación gráfica se utiliza con el fin de comprender, gestionar y seleccionar materiales con resistencia a la corrosión, lo que resulta de vital importancia en aplicaciones industriales y de ingeniería.

4. Detección de corrosión en estructuras de hormigón armado

En el presente apartado se revisan las diferentes técnicas para la detección de corrosión en estructuras de hormigón, incluyendo tanto los ensayos basados en

técnicas destructivas y no destructivas como las técnicas de monitorización existentes basadas en el empleo de sensores.

Existen diferentes tipos de técnicas para conocer si la estructura se encuentra corroída o en proceso de corrosión avanzado, las cuales se dividen en métodos destructivos y no destructivos. En este trabajo nos centraremos en los métodos no destructivos (END) debido a que estas técnicas son valiosas a la hora de llevar a cabo una evaluación del estado de la estructura, mientras que las técnicas destructivas se emplean más en situaciones específicas en las que, generalmente, la estructura se encuentra más deteriorada.

Como alternativa a la evaluación del estado estructural mediante inspecciones, se está desarrollando una tendencia a llevar a cabo un seguimiento continuo de la corrosión de la estructura mediante una monitorización que emplea sensores.

Según la Real Academia Española, la palabra *sensor* se define como “un dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente” [25]

En Europa, se han empleado sensores para la monitorización y la evaluación de estructuras de hormigón armado como puentes, edificios, entre otros tipos. Ante la necesidad de conocer de forma rápida y eficiente el estado de las estructuras se han desarrollado sensores capaces de medir parámetros importantes en estas. Específicamente para la corrosión se desarrollaron en dos clases: sensores físicos y sensores químicos.

Los sensores físicos son aquellos que detectan cambios en los parámetros físicos tales como presión, masa, temperatura, etc. Para una correcta interpretación y adquisición de información, se deben diseñar estos sensores teniendo en cuenta un esquema que permita tener una adquisición de datos, un procesamiento de los datos adquiridos y una distribución de estos. Se clasifican dependiendo del principio físico donde se dividen en activos y pasivos, el tipo de señal que genere; ya sea analógica, digital o temporal, el campo de valor que mide y según su forma.

Por otra parte, los sensores químicos son capaces de detectar cambios químicos como el pH, potencial, velocidad de corrosión, entre otros. De los sensores químicos se derivan los sensores electroquímicos; estos se comportan como un medio conductor entre el elemento a estudiar. Para este tipo de sensores contamos con dispositivos de medición sencilla como los potenciómetros, los cuales nos permiten tener una medida del potencial eléctrico.

4.1.INSPECCIÓN Y ENSAYOS

4.1.1. Métodos Destructivos

Los ensayos mediante métodos destructivos en hormigón armado para la detección de corrosión en sus armaduras implican la extracción de muestras de la estructura, lo que permite una evaluación directa y detallada del estado de las armaduras. Aunque estos métodos pueden causar cierto daño a la estructura, proporcionan información valiosa sobre la presencia y la extensión de la corrosión.

4.1.1.1. EXTRACCIÓN DE TESTIGOS

La técnica de extracción de testigos consiste en realizar perforaciones en la estructura para extraer núcleos cilíndricos del material con el objetivo de analizarlos en el laboratorio.



Figura 14. Extracción de testigos

Se debe de seleccionar cuidadosamente la ubicación de la extracción de los testigos para así evitar generar daño a la estructura. Generalmente el diámetro y la longitud de los núcleos depende de los requisitos específicos del análisis y la normativa aplicable. Las herramientas de perforación empleadas son equipos especializados para realizar perforaciones precisas como brocas diamantadas.

Una vez extraídos los testigos, estos son trasladados al laboratorio donde se le realizan distintos análisis para evaluar su estado, las propiedades del elemento y si la composición química del hormigón compromete la corrosión del acero, midiendo factores como la carbonatación (mediante la medida del pH), o el contenido de cloruros.

4.1.1.2. CALICATAS

La ejecución de calicatas con extracción de testigos de acero es un procedimiento específico destinado a inspeccionar visualmente el estado de las armaduras y, en su caso, obtener muestras representativas de las armaduras de acero embebidas en el hormigón. Este proceso se realiza para determinar las características de las armaduras y evaluar su estado, buscando indicios de corrosión u otro tipo de deterioro.

Inicialmente, se selecciona cuidadosamente el sitio de la calicata, considerando factores como la exposición a agentes corrosivos y señales visuales de deterioro. Después, se excava una abertura en la estructura, tan grande como para extraer testigos de hierro con herramientas especializadas como taladros o barrenos. Los testigos extraídos ofrecen secciones transversales que posibilitan una evaluación detallada de la condición interna de las armaduras, incluyendo la detección visual de corrosión, deformaciones o grietas. Además, se pueden recolectar muestras adicionales del hormigón circundante para pruebas de laboratorio complementarias. La información recopilada, con datos visuales y resultados de análisis de laboratorio, evalúa el estado de las armaduras y orienta la toma de decisiones sobre medidas de mantenimiento, reparación o rehabilitación necesarias para asegurar la durabilidad y seguridad a largo plazo de la estructura de hormigón armado.

4.1.2. Métodos No Destructivos

Los ensayos mediante métodos no destructivos (END) en hormigón armado son técnicas de evaluación que permiten detectar posibles problemas, como la corrosión en las armaduras, sin causar daño visible o irreversible a la estructura. Estos métodos son valiosos para la inspección y monitoreo continuo de las condiciones internas de las estructuras sin la necesidad de realizar perforaciones o extracciones de material.

4.1.2.1. INSPECCIÓN VISUAL

El método tradicional para determinar si una armadura se encuentra corroída consiste en la inspección visual. Esta técnica se basa en la observación directa del elemento para identificar si existen signos viables de corrosión tales como manchas, decoloración, óxido, grietas o pérdida de material.



Figura 15. Inspección visual. (2021) [26]

En esta técnica se examina minuciosamente la superficie del elemento con herramientas como linternas, cámaras o microscopios para facilitar la visualización de áreas de difícil acceso o para ampliar a detalle. Además de la inspección visual, se pueden realizar pruebas de percusión como golpes suaves, esto para detectar cambios en el sonido; pruebas de adherencia, para evaluar la adhesión del revestimiento que protege la zona o pruebas de espesor donde se miden los espesores de los recubrimientos en busca de alguna reducción.

Es importante destacar que la inspección visual es una técnica inicial y superficial que puede detectar signos visibles de corrosión. Sin embargo, no proporciona información detallada sobre la extensión o el grado de corrosión, ni permite evaluar la corrosión en áreas inaccesibles o internas del elemento. [27]

4.1.2.2. PACHOMETRO

El pachómetro, también conocido como medidor de espesores de recubrimiento, desempeña un papel esencial en la inspección de estructuras de hormigón armado al medir con precisión el espesor del recubrimiento que protege las armaduras de acero embebidas en la estructura. Este dispositivo utiliza principios electromagnéticos o ultrasónicos para emitir señales que interactúan con el hormigón, proporcionando lecturas en tiempo real o registros para evaluar el espesor del recubrimiento. Al colocarse sobre la superficie del hormigón y ajustarse

según las características de la estructura, el pachómetro ofrece una forma no destructiva de obtener información crucial sobre la integridad de las armaduras. La interpretación de las lecturas se realiza comparándolas con estándares de diseño y normativas que establecen los espesores mínimos de recubrimiento requeridos para prevenir la corrosión. Este dispositivo se utiliza durante inspecciones de rutina, construcción o evaluación de estructuras existentes, siendo especialmente útil en áreas críticas expuestas a condiciones adversas. En definitiva, el pachómetro facilita una inspección eficiente y precisa que contribuye a garantizar la durabilidad y seguridad a largo plazo de las construcciones de hormigón armado.

4.1.2.3. GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

El ground penetrating radar o en español radar de penetración terrestre, se clasifica como una técnica no destructiva de exploración geofísica. Esta técnica emplea ondas electromagnéticas de alta frecuencia la cual logra detectar y mapear los objetos que se encuentran en la estructura. El GPR en el hormigón armado, funciona mediante la señal que se emite por la antena que logra penetrar el material y se refleja en las barras de refuerzo, lo cual permite el detectar su ubicación.

La corrosión en las barras de refuerzo produce un aumento de volumen en el interior del elemento lo cual genera fisuras y debilita el hormigón que las rodea, lo que a largo plazo afecta de manera directa la durabilidad de la estructura y de paso compromete su fase de servicio.

Al aplicar esta técnica, se logra detectar la presencia de corrosión puesto que la señal que se refleja con el acero es diferente si este se encuentra corroído a que si se encuentra en buen estado. Los datos obtenidos a lo largo del tiempo se almacenan en conjunto de trazas el cual se denomina radargrama donde se observan las amplitudes de energía mediante escalas de colores. La norma ASTM D6087-08 standard ^[28] cubre a mayor detalle los numerosos procedimientos a realizar con la técnica GPR.

4.1.2.4. Gammagrafía o Tomografía

La gammagrafía o tomografía en estructuras de hormigón armado se considera una técnica no destructiva. Esta técnica posee semejanza con las radiografías empleadas en el campo de la medicina a diferencia de que esta trabaja con rayos gamma.

En esta técnica emplea una fuente de carácter radioactivo la cual consiste en colocar una fuente emisora de rayos gamma de un lado de la estructura y del otro una placa de radiografía; obteniendo así imágenes que nos permiten ubicar la zona donde se encuentran las barras de acero conociendo su diámetro y así evaluar el estado de estas.

Los resultados obtenidos mediante gammagrafía se consideran precisos y fiables, además la aplicación de esta técnica ha permitido el estudio de estructuras que anteriormente se consideraban de difícil acceso.

4.1.2.5. Corrosímetro

El corrosímetro, un dispositivo que utiliza principios eléctricos para medir la variación del potencial entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia emplazado en el hormigón comparte similitudes fundamentales con los sensores utilizados en otras aplicaciones.

El procedimiento técnico implica la humectación controlada de la zona a evaluar y la conexión de la armadura al polo positivo, así como la vinculación del electrodo de referencia al polo negativo. Ambos se conectan a un multímetro de precisión con una sensibilidad de 1 mV. La evaluación del riesgo de corrosión se determina según los valores medidos, considerándose bajo si superan los -200 mV y alto si son inferiores a -400 mV. Es crucial señalar que este valor no proporciona una cuantificación precisa de la corrosión del elemento, sino que indica la posibilidad de que esté ocurriendo en el momento de la medición. La interpretación de los resultados se realiza mediante la comparación de lecturas a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta factores ambientales para una evaluación más completa. Este

enfoque técnico permite una medición precisa y la consideración de riesgos potenciales de corrosión en estructuras de hormigón armado.

4.2. SENSORES

4.2.1. Sensores potenciométricos

Los sensores potenciométricos se basan en diferencia de potencial que se establece entre electrodos, en este caso; uno de referencia (RE) y otro de medida (WE) para así obtener el potencial de corrosión (E_{corr}). La corrosión de las armaduras que se encuentran embebidas en el hormigón genera electrones y iones metálicos que se desplazan a través del hormigón, generando así un diferencial de potencial eléctrico entre ambos elementos. [29]

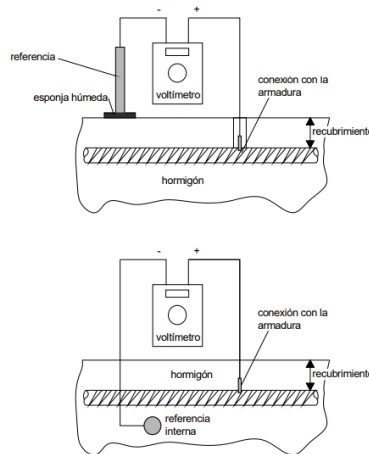


Figura 16. Esquema de medida del potencial de corrosión de la armadura embebida mediante sensores de referencia con solución de iones conocida y sumergida. [30]

Existen diferentes tipos de sensores basados en electrodos de referencia basados en soluciones químicas, los más comunes son:

- Calomelanos; Hg / Hg_2Cl_2
- Cobre/ Sulfato de cobre; $Cu / CuSO_4$.
- Plata/ Cloruro de plata; $Ag / AgCl$

- Mercurio/ Sulfato
- Zinc/ Agua de mar

A demás, existen técnicas potenciométricas como la técnica de resistencia a la polarización la cual consiste en la evaluación de la corrosión en hormigón armado mediante la aplicación de una pequeña corriente eléctrica al sistema electroquímico formado por el acero de refuerzo y el hormigón. Al emplear un electrodo de referencia en el hormigón y la armadura como contraelectrodo, se mide la resistencia al flujo de corriente, la cual está directamente relacionada con la velocidad de corrosión. A medida que el acero se corroe, la resistencia aumenta, proporcionando indicadores sensibles de cambios corrosivos. Además de la resistencia, se pueden registrar parámetros electroquímicos como el potencial de corrosión y la densidad de corriente.

La clasificación del riesgo de corrosión se realiza teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la normativa UNE 112083:2010, la cual establece unos valores límites de referencia donde se consideran tres rangos representativos de probabilidad:

- La probabilidad de que existan procesos activos de corrosión de armaduras en el momento de la medición es menos del 10%
- La probabilidad de que existan procesos activos de corrosión de armaduras en el momento de la medición es del orden del 50%
- La probabilidad de que existan procesos activos de corrosión de armaduras en el momento de la medición es mayor del 90%

Estas probabilidades tienen un valor límite establecido dependiendo del tipo de electrodo que se emplee.

Electrodo	Valores límite de E_{corr} para riesgo de corrosión		
	< 10 %	$\cong 50\%$	> 90%
Cu/CuSO ₄ saturado	> - 275 mV	- 275mV < E_{corr} < - 425mV	< - 425 mV
Calomelanos (ESC)	> - 200 mV	- 200mV < E_{corr} < - 350mV	< - 350mV

Figura 17. Valores límites de referencia de potencial. [31]

Estos sensores son frecuentemente empleados en la monitorización de la corrosión debido a que pueden realizar mediciones como potencial de corrosión, penetración de cloruros o de pH [32] como se puede apreciar en la Figura 18. Una de las principales ventajas de emplear este tipo de sensores es que logra detectar la corrosión en las primeras etapas, evitando así que se lleguen a producir daños estructurales de mayor importancia.

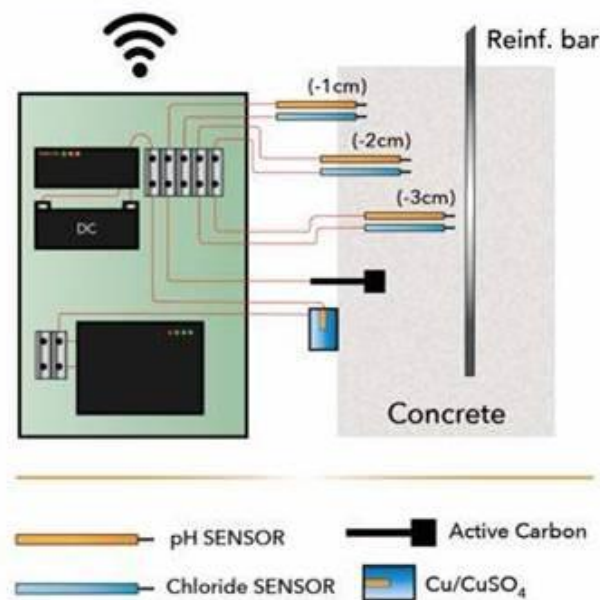


Figura 18. TEMLab [33]

4.2.2. Sensores electroquímicos

El empleo de sensores electroquímicos en la medición de la corrosión en armaduras de hormigón armado ha sido objeto de numerosas investigaciones y aplicaciones en el campo de la monitorización de corrosión en estructuras armadas.



Figura 19. Sensor electroquímico de temperatura, potencial y velocidad de corrosión.

Estos sensores se basan principalmente en principios electroquímicos para medir parámetros como velocidad y potencial de corrosión, la I_{corr} se mide en términos de pérdida de material por unidad de tiempo, proporcionando así información precisa y verídica sobre el estado de la corrosión en la estructura. Hay diferentes estudios donde se demuestra la efectividad de estos sensores en la monitorización de estructuras ya sean expuestas directamente a agentes corrosivos o no, algunos de ellos son *“Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures”* [34]

El IETcc desarrolló un sensor electroquímico el cual se ha diseñado para el uso tanto en una estructura existente como en una en construcción, como se aplica en esta investigación. Este sensor (Figura 19) se diseñó para ser compatible con la estructura y de gran durabilidad. Permiten medir de manera precisa el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la temperatura.

Esta investigación y otras similares respaldan la aplicación de los sensores electroquímicos en la monitorización, además existen distintas normas técnicas y estándares internacionales que describen los procedimientos de medición y las recomendaciones para el uso de este tipo de sensores, como lo es la norma ASTM G109-07 [35]

4.3. LIMITES ESTABLECIDOS

En este apartado, se abordará la evaluación del potencial de corrosión y los límites establecidos por la norma ASTM C876-15, titulada "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". Esta norma define criterios específicos para clasificar el riesgo de corrosión en estructuras de hormigón armado, estableciendo tres categorías distintas en función del potencial de corrosión.

Asimismo, se explorarán los límites de velocidad de corrosión (I_{corr}) según las directrices de la normativa UNE 112083 de 2010, que propone niveles de corrosión específicos en base a los valores de I_{corr} en unidades de $\mu A/cm^2$. Este análisis proporcionará una base fundamental para la evaluación y clasificación de la corrosión en estructuras de hormigón, según las normativas vigentes en la industria.

De acuerdo con lo expuesto en la norma ASTM C876-15 ^[36] "Standard Test Method for Corrosión Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete" se establecen unos límites para la evaluación del potencial de corrosión los cuales se clasifican en:

- Riesgo bajo de corrosión: Un potencial de corrosión de -575 mV o superior en escala negativa.
- Riesgo moderado de corrosión: Un potencial de corrosión entre -575 mV y -750 mV.
- Riesgo alto de corrosión: Un potencial de corrosión de -750 mV o inferior en escala negativa.

Para los límites de la velocidad de corrosión (I_{corr}) la normativa UNE 112083 de 2010 establece tres límites divididos en niveles de corrosión tal y como se aprecia en la Figura 20. Cuando los valores se sitúan en unidades de $\mu A/cm^2$ por debajo o igual a 0,1, se considera que la corrosión es despreciable. En el rango de 0,1 a 0,5 $\mu A/cm^2$, se clasifica como corrosión baja, y valores que superan 0,5 $\mu A/cm^2$ se catalogan como corrosión moderada a alta.

<i>I</i> _{corr} (μA/cm ²)	Nivel de Corrosión
≤ 0,1	Despreciable (pasivo)
0,1 – 0,5	Bajo
0,5 – 1 >1	Moderado Alto

Figura 20. Criterios de evaluación de la velocidad de corrosión [37]

5. Casos de aplicación de sensores de corrosión a estructuras de hormigón

El empleo de sensores de corrosión en estructuras de hormigón armado es relativamente reciente. En Europa, se han empleado ampliamente para la monitorización y evaluación de estructuras de hormigón armado como puentes, edificios, túneles, presas, en la industria del petróleo y gas, industria naval y otros tipos de infraestructuras.

Algunos países europeos como España, Italia, Francia, Alemania y el Reino Unido han sido pioneros en la aplicación de este tipo de sensores y han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación y desarrollo en este campo los cuales se detallarán a continuación. En las últimas décadas, se ha avanzado significativamente en el desarrollo de sensores de corrosión y en su aplicación en estructuras de hormigón armado para detectar y monitorear la corrosión de las armaduras y prevenir su progresión.

En España, se han empleado monitorizaciones de la corrosión en estructuras como el Hipódromo de la Zarzuela. En esta infraestructura tan conocida, se ubicaron sensores en las cubiertas y los tirantes de estas para así poder medir su potencial de corrosión. El sensor fue desarrollado y puesto en marcha por miembros del Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETCC) y consiste en el empleo de un electro de referencia de Mn/MnO₂ el cual se conecta a la armadura en cuestión a analizar para así evaluar su potencial electroquímico y conocer la probabilidad de que el elemento monitorizado pueda llegar a sufrir corrosión [38]

También encontramos sensores de corrosión en el proyecto Reshealience llevado a cabo por Rover marítimo y Reshealience financiado por el Programa Europeo H2020. Este consistió en la inserción de sensores “Corrochip” que permitieran monitorizar la corrosión de la estructura en tiempo real y en la evaluación de agentes corrosivos de estos, el elemento se instaló en el Puerto de Sagunto y su material principal fue un hormigón UHDC. Los resultados obtenidos después de 1.5 años fueron favorecedores debido a que la evolución de la intensidad como el potencial de corrosión no tuvieron evolución alguna, concluyendo que la estructura no presentaba ningún tipo de signo de corrosión. ^[39] El funcionamiento de este sensor “Corrochip” se basa en la medición de los valores de potencia, intensidad y velocidad de corrosión. Es un sensor que proporciona datos en tiempo real, lo cual resulta beneficioso al momento de realizar una evaluación precisa del estado de las armaduras de la estructura/elemento; además se adapta de manera fácil a cualquier tipo de estructura. ^[40]

En la comunidad de Cataluña, en tres torres de ruptura de carga del colector de Salmueras de la cuenca del río Llobregat también se implementó el uso del corrochip. Mediante la introducción de estos sensores en el hormigón, se logró la monitorización en tiempo real de la estructura, haciendo posible el análisis del deterioro con un alto grado de fiabilidad y así lograr anticiparse a cualquier contratiempo o situación que pudiera significar un peligro para la estructura. ^[41]

Capítulo 3. Casos prácticos

En este capítulo se abordan dos casos prácticos significativos que ejemplifican la aplicación de las técnicas de monitorización en el ámbito de la ingeniería civil y la gestión de infraestructuras. A través de un enfoque integral, exploraremos una obra de construcción nueva y una estructura rehabilitada, donde se llevó a cabo un riguroso proceso de monitorización. Esta monitorización abarca tanto el comportamiento estructural como los parámetros de durabilidad, en particular, la corrosión de elementos críticos.

Cada caso se presenta detalladamente, comenzando con la descripción del proyecto y del entorno en el que se encuentra la estructura. Se expondrá el plan de monitorización implementado, que incluye la selección de ubicaciones estratégicas para la instalación de sensores y la recopilación de datos en tiempo real. Posteriormente, se analizarán y discutirán en profundidad los resultados obtenidos a través de esta monitorización, evaluando el estado de la estructura y su comportamiento a lo largo del tiempo.

Estos casos prácticos ofrecen una visión valiosa sobre la efectividad de las técnicas de monitorización en la evaluación y gestión de infraestructuras, así como en la toma de decisiones fundamentadas en relación con la durabilidad y la seguridad a largo plazo de las estructuras civiles. A través de la exploración de estos ejemplos concretos, se busca ilustrar cómo la monitorización puede desempeñar un papel fundamental en la preservación y optimización de nuestras infraestructuras, contribuyendo a su sostenibilidad y rendimiento a largo plazo.

1. Plaza de la Reina

1.1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El proyecto inicial del aparcamiento está firmado por el Ingeniero de Caminos, C. y P., D. Antonio Llesa, en noviembre del año 1968 y visado en el colegio de Ingenieros de Caminos en junio de 1971. Además, el promotor fue el anterior concesionario **Estacionamientos Madrid, S.A** y la empresa contratista adjudicataria fue COMYLSA.

De acuerdo con la información suministrada en documentos anteriores y obtenida en visitas preliminares, el aparcamiento sufría una serie de deterioros y patologías que en su momento requirieron de reparación. Al parecer estas no fueron llevadas a cabo de manera correcta o en profundidad por la empresa encargada de estas intervenciones dando paso a que empeoraran.

En general, los daños y lesiones detectados estaban relacionados con problemas de corrosión de armaduras y pérdida de recubrimiento del hormigón, en algunos casos, bastante generalizados. Las lesiones se evidenciaron principalmente en losas de rampas de acceso y en juntas de construcción entre las losas de cubierta y en soportes y ménsulas cortas de apoyo de vigas principales.



Figura 21. Lesiones evidenciadas. Fuente: (CALSENS)

Los procesos de corrosión están relacionados directamente con la presencia de humedades. Los daños más importantes son aquellos que se presentaron en zonas

donde discurría el agua, como lo era en la unión de las juntas constructivas del forjado de cubierta, esto debido en gran medida a la falta de impermeabilización o al deterioro de la estructura.

La estructura del aparcamiento subterráneo se construyó en los años 70 y esta se localiza en el centro de Valencia bajo la emblemática Plaza de la Reina, entre las calles la Paz y San Vicente Mártir. La Figura 22 muestra la localización del proyecto.



Figura 22. Emplazamiento de la estructura en Google Maps. Recuperado de URL:
<https://goo.gl/maps/v59wn5LoxtKkUbyn8>

El aparcamiento consta de dos plantas de sótanos dedicadas al aparcamiento de vehículos ligeros. Cada planta, se compone de cinco naves de longitudes de 47.50 m, paralelas entre sí y con ejes perpendiculares a la longitud mayor, es decir en dirección este-oeste. Las naves se conectan entre sí por medio de dos pasillos perpendiculares para el acceso y salida de vehículos. El acceso de vehículos se realizó mediante rampas resueltas mediante acuerdos circulares con radio de giro constante y desarrollos en espiral. El acceso de peatones es a pie mediante tres escaleras con salida a tres zonas distintas de la plaza.

El proyecto se encuentra ejecutado con alzado de muros perimetrales de hormigón en masa de espesor de 0.70m, soportes, vigas y forjados tipo losa de hormigón armado. La distribución interior de la estructura se distribuye a partir de naves perpendiculares al lado mayor con longitudes de 47.50m y 15.50m de luz libres.

Estas están delimitadas por la alineación de pilares los cuales están separados 2.5m con vigas isostáticas de sección en “V” sobre las que la losa de forjado esta empotrada.

Para el forjado de cubierta (techo planta 1°) las vigas tienen un canto total de 1.10m con un espesor de losa 20cm. Las vigas del forjado intermedio (techo planta 2°) tienen un canto total de 0.75m con espesor de losa de 15cm. Sobre estos se encuentra un recrido de hormigón en masa que da nivelación a la estructura en la parte superior, los valores son variables según la necesidad de cada punto. En la siguiente figura podemos observar una vista en planta del aparcamiento.

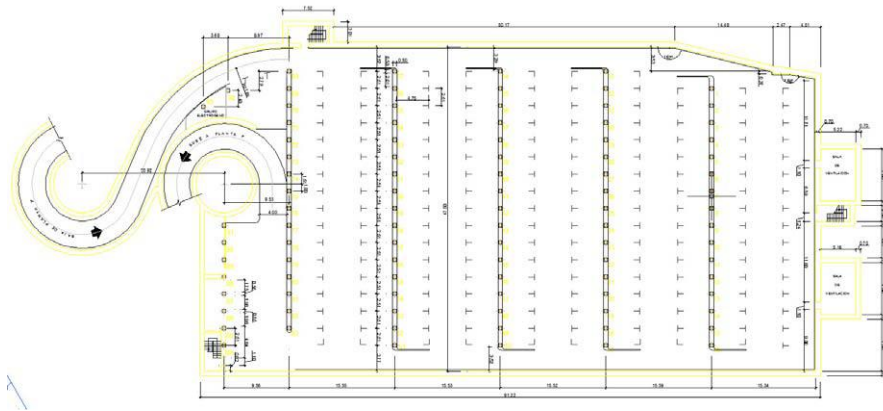


Figura 23. Vista en planta general del aparcamiento

A continuación, podemos observar a detalle el armado de forjado y las vigas de las plantas -1 y -2 del aparcamiento.

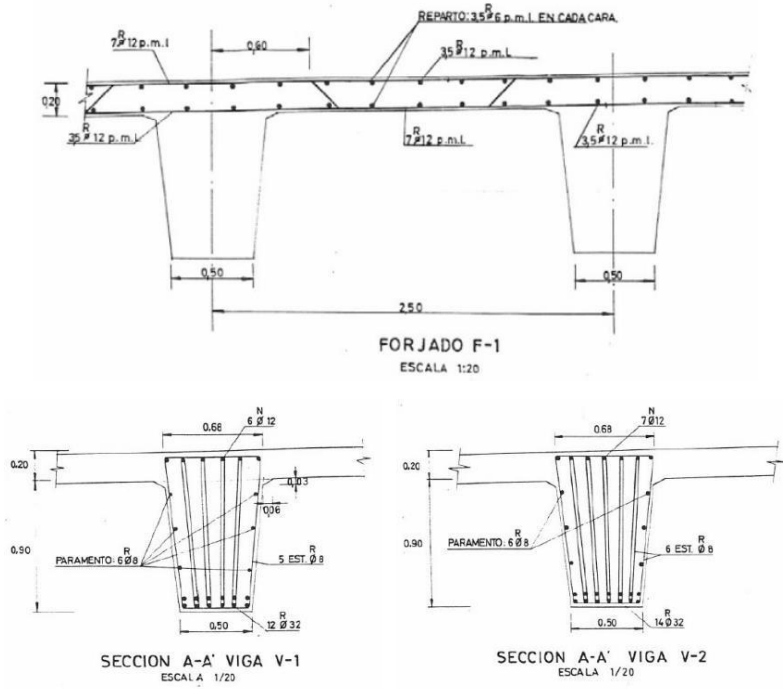


Figura 24. Detalles del armado de forjado y vigas de la planta -1 del aparcamiento

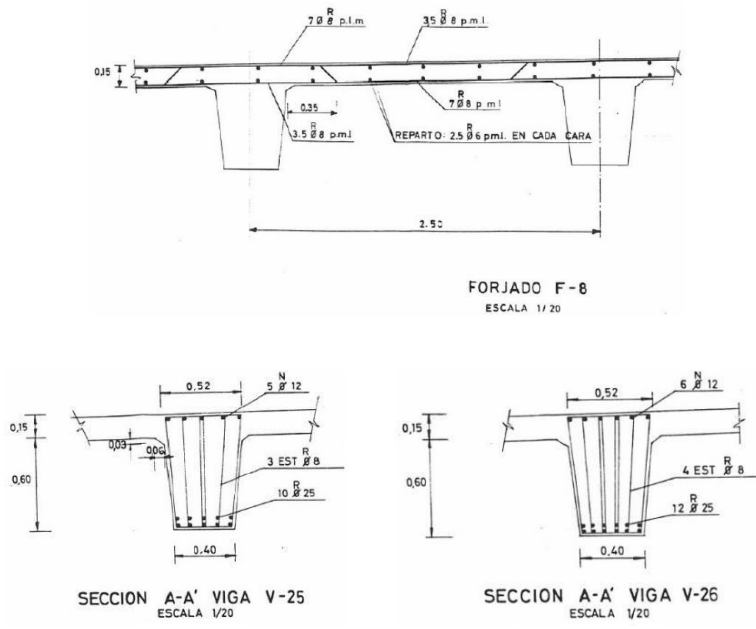


Figura 25. Detalles de sección de armado de forjado y vigas de la planta -2 del aparcamiento

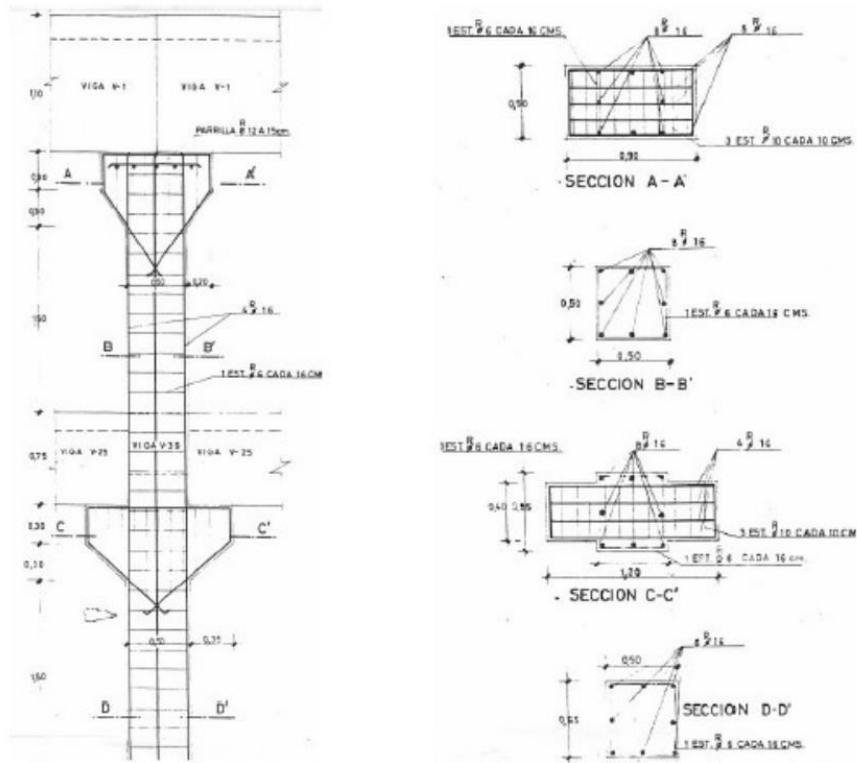


Figura 26. Detalles de sección de armado de pilares y ménsulas dobles de las plantas -1 y -2 del aparcamiento

Para el proyecto se consideraron acciones de cálculo obteniendo valores como las cargas permanentes debidas al peso propio, las sobrecargas en cada planta, entre otras.

Los materiales y coeficiente de ponderación considerados para el cálculo y dimensionamiento de la estructura se resumen en el empleo de un hormigón de resistencia característica de 210 kg/cm² en pilares, vigas y forjado, limitado en pilares a un 90% de ese valor; para cimientos, soleras y muros se empleó un hormigón de resistencia característica de 140 kg/cm². Para el armado se empleó acero de alta adherencia de 4.600 kg/cm² de limite elástico. Los coeficientes de mayoración de las cargas fueron de 1,65 mientras que el coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón fue de 1,60 y el coeficiente de minoración de la resistencia del acero se fijó en 1,20 siendo limitado a 3.750 kg/cm² en barras a compresión o en armadura de cortante.

Los informes y visitas previas ^[42] mostraron que la estructura se encontraba afectada por agentes de carbonatación los cuales daban paso a una corrosión generalizada. Este tipo de corrosión afecta de manera uniforme toda la superficie del material afectado debido al debilitamiento del filme de pasivación que protege el elemento.

Algunos de los elementos afectados fueron las rampas, donde los daños más significativos se situaban en los alzados de los muros curvos que funcionan como muros de contención de las tierras de las zonas ajardinadas y en las losas de forjado de las propias rampas. En los muros perimetrales, soportes y ménsulas cortas, las vigas y forjados de la losa, soleras, etc. también se encontraron patologías referentes a la corrosión.

Se realizaron campañas de ensayos de información donde se emplearon ensayos no destructivos como la velocidad de ultrasonidos en soportes, adicionalmente se realizaron ensayos de probetas testigo donde se obtuvieron valores representativos de la resistencia a compresión en distintos elementos como pilares, vigas, muros y a nivel general. Otros de los ensayos llevados a cabo fueron ensayos de profundidad de carbonatación, contenido de cloruros, porosidad y potencial de corrosión.

La velocidad de ultrasonidos arrojó resultados que se adaptan a una distribución normal, siendo estos valores correspondientes a un hormigón de calidad entre aceptable y excelente, según bibliografía estudiada.

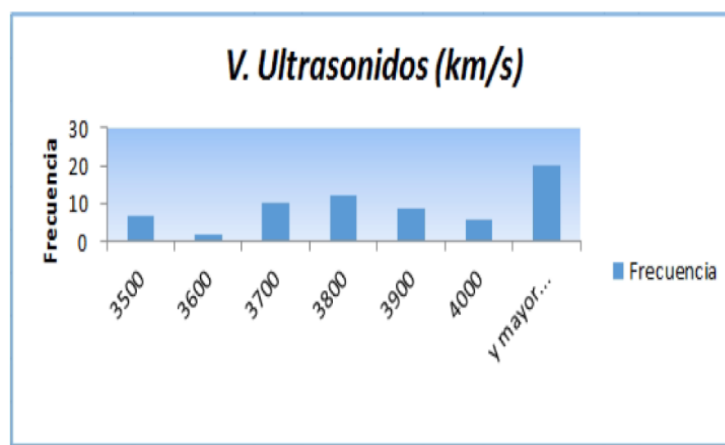


Figura 27. Velocidad de ultrasonidos antes de la rehabilitación. ^[42]

Se extrajo un total de 27 probetas testigo para su ensayo en laboratorio, repartidas de la siguiente manera:

- En el sótano 1, 6 en pilares, 5 en vigas y 1 en muro
- En el sótano 2, 6 en pilares, 5 en vigas y 2 en muros.

Obteniendo como resultado los siguientes valores:

RESISTENCIA A COMPRESIÓN PILARES ($f_c/0,9$ - MPa)				
Nº VALORES	MÁXIMO	MÍNIMO	VALOR MEDIO	COEF.VAR.
12	24,67	13,78	20,19	15,19%
RESISTENCIA A COMPRESIÓN VIGAS ($f_c/0,9$ - MPa)				
Nº VALORES	MÁXIMO	MÍNIMO	VALOR MEDIO	COEF.VAR.
10	30,22	17,67	24,17	16,28%
RESISTENCIA A COMPRESIÓN MUROS ($f_c/0,9$ MPa)				
Nº VALORES	MÁXIMO	MÍNIMO	VALOR MEDIO	COEF.VAR.
3	23,56	20,44	-	-
RESISTENCIA A COMPRESIÓN GLOBAL ($f_c/0,9$ - MPa)				
Nº VALORES	MÁXIMO	MÍNIMO	VALOR MEDIO	COEF.VAR.
25	30,22	13,78	22,00	17,33%

Figura 28. Valores obtenidos de la prueba de resistencia a compresión en testigos antes de la rehabilitación.^[42]

Respecto a los valores obtenidos, estos corresponden a una distribución normal con tendencia asimétrica, lo que corresponde a un hormigón de uniformidad entre buena y aceptable para la calidad de la época.

El ensayo de Velocidad de corrosión (Icorr) se realizó en elementos tales como vigas y pilas en los sótanos de la estructura. Se obtuvieron valores presentados en las siguientes graficas.

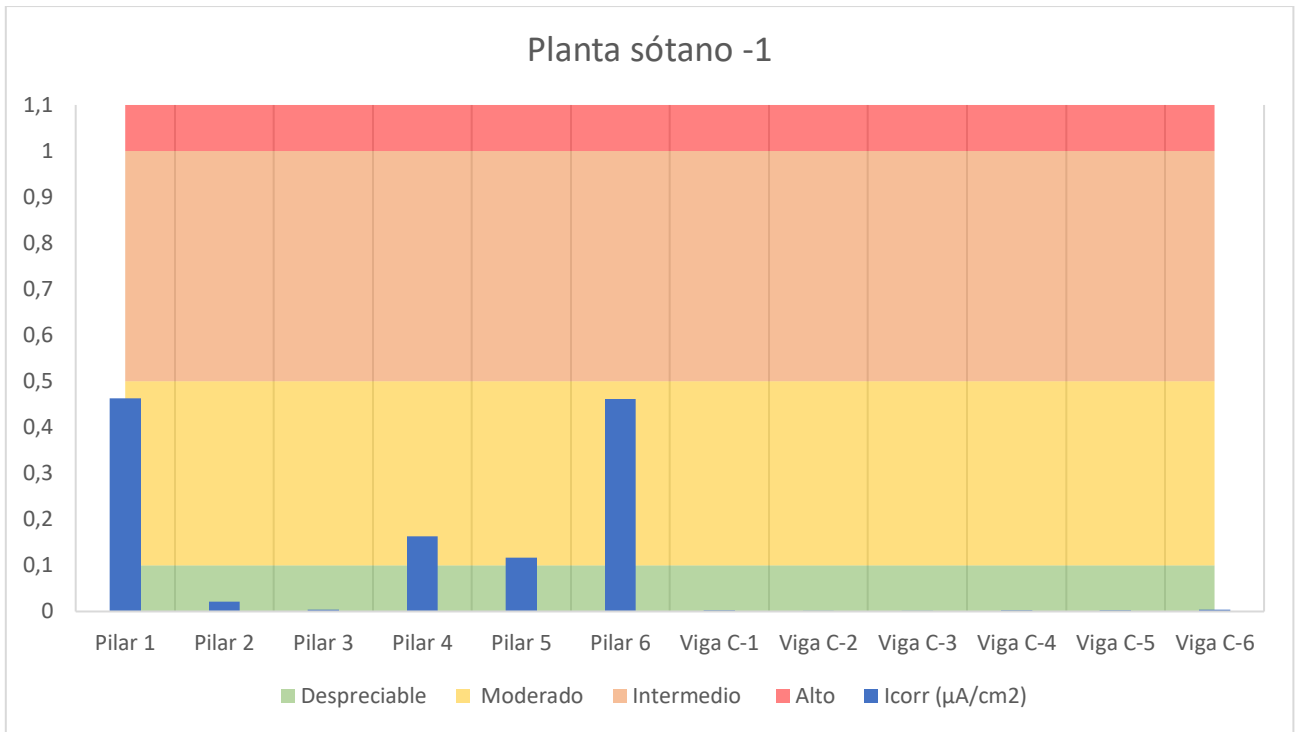


Figura 29. Velocidad de Corrosión en sótano -1

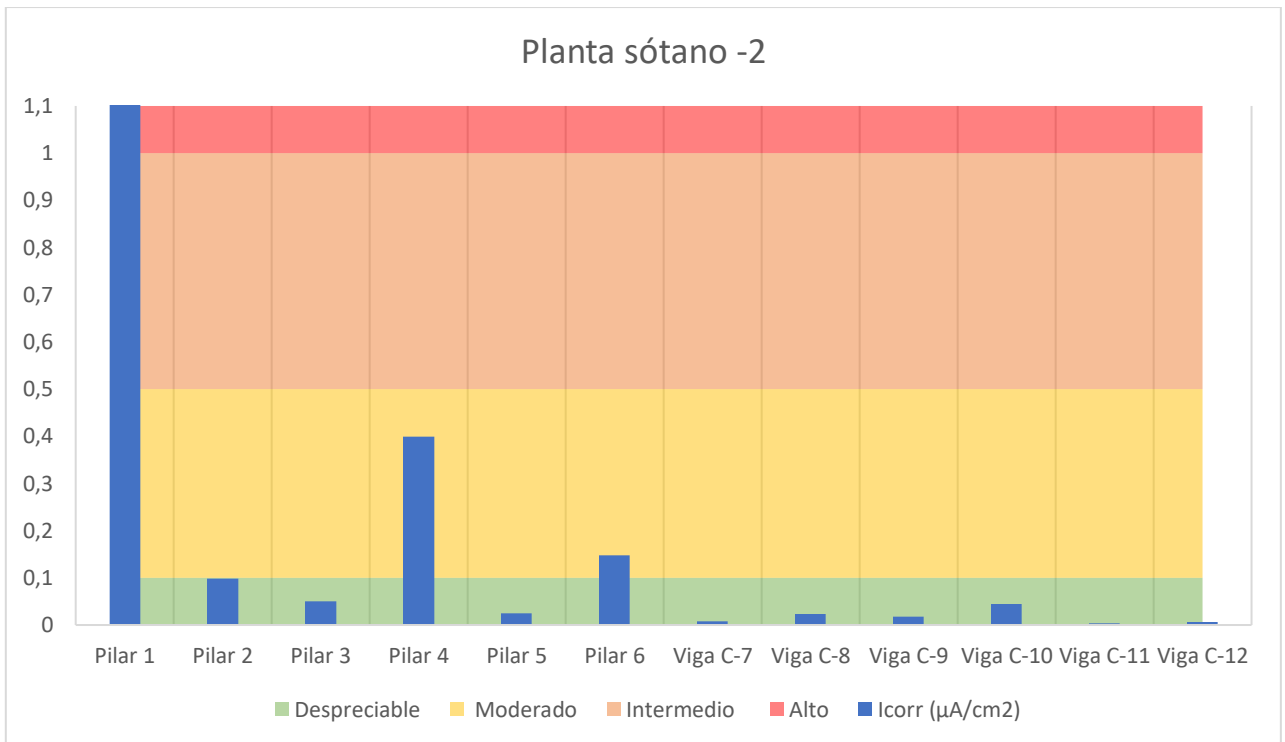


Figura 30. Velocidad de Corrosión en sótano -2

Se logran obtener valores dentro de los rangos establecidos por la normativa UNE 112083 de 2010 la cual establece límites divididos en niveles de corrosión. Cuando los valores se sitúan en unidades de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ por debajo o igual a 0,1, se considera que la corrosión es despreciable. En el rango de 0,1 a 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, se clasifica como corrosión baja, y valores que se sitúan entre 0,5 y 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ se catalogan como corrosión moderada, si los valores son mayores a 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ se considera una corrosión alta. Como observamos en la figura 29, los datos obtenidos para el pilar 1 y 6 en el sótano -1 muestran una corrosión activa encontrándose en un rango de corrosión moderada, no llegando a superar el valor de 0.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Para el sótano -2, se evidencia una corrosión muy activa en el pilar 1, obteniendo un valor de 2.548 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, situándose en un rango de corrosión alta.

El ensayo de potencial de corrosión (E_{corr}) se midió directamente sobre la estructura, esto con el fin de buscar una magnitud que indicara aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de las armaduras embebidas en el hormigón. Se realizaron un total de 18 determinaciones de potencial de corrosión comprendidas en elementos como soportes, jácenas y riostras.

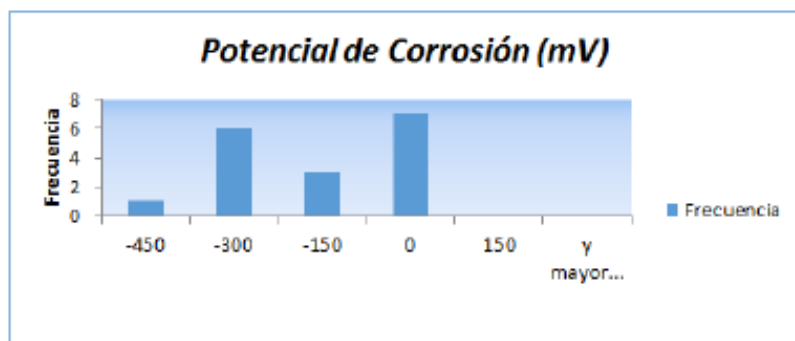


Figura 31. Potencial de corrosión medido en elementos antes de la rehabilitación.^[42]

Del análisis de los resultados obtenidos y basándonos en la bibliografía especializada en establecer los límites de riesgo de corrosión se deduce que alrededor de un 50% de los puntos analizados presentan un riesgo de corrosión bajo, el 33% de los puntos presenta un riesgo de corrosión elevado y el 12% restante se clasifica en un riesgo de corrosión moderado.

Para llevar a cabo la evaluación del potencial, se realizaron ensayos mediante corrosímetros portátiles en las vigas y pilares de ambos sótanos existentes en el proyecto. Los resultados obtenidos se presentan de manera agrupada en las siguientes representaciones gráficas.

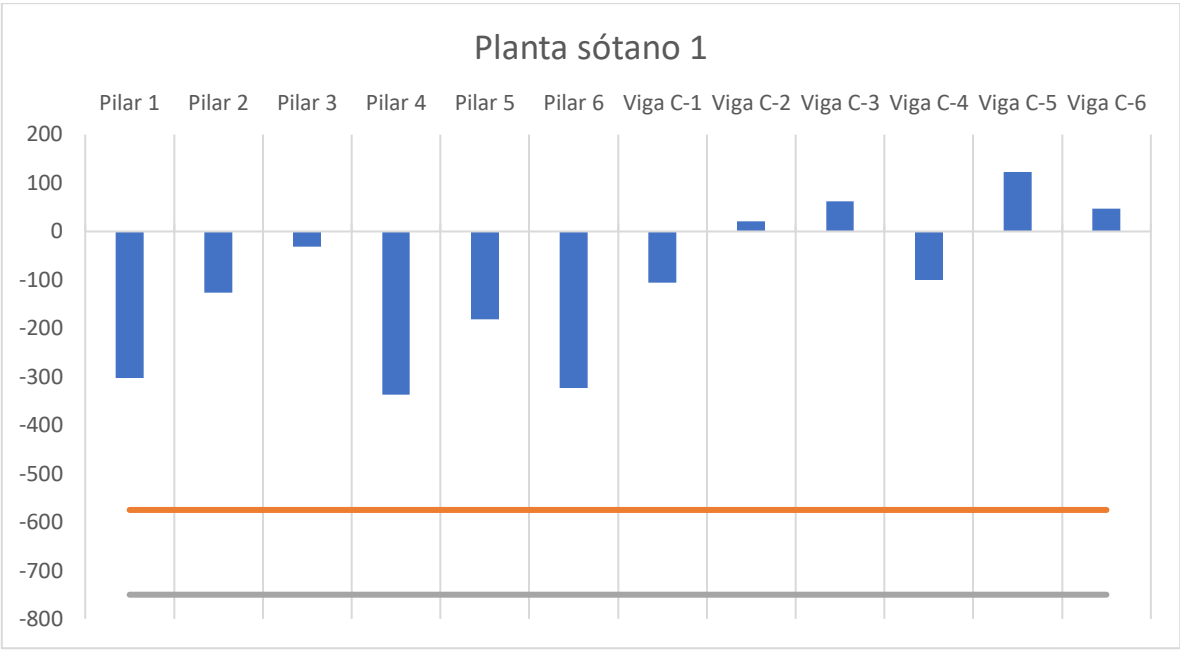


Figura 32. Potencial de corrosión en planta sótano -1

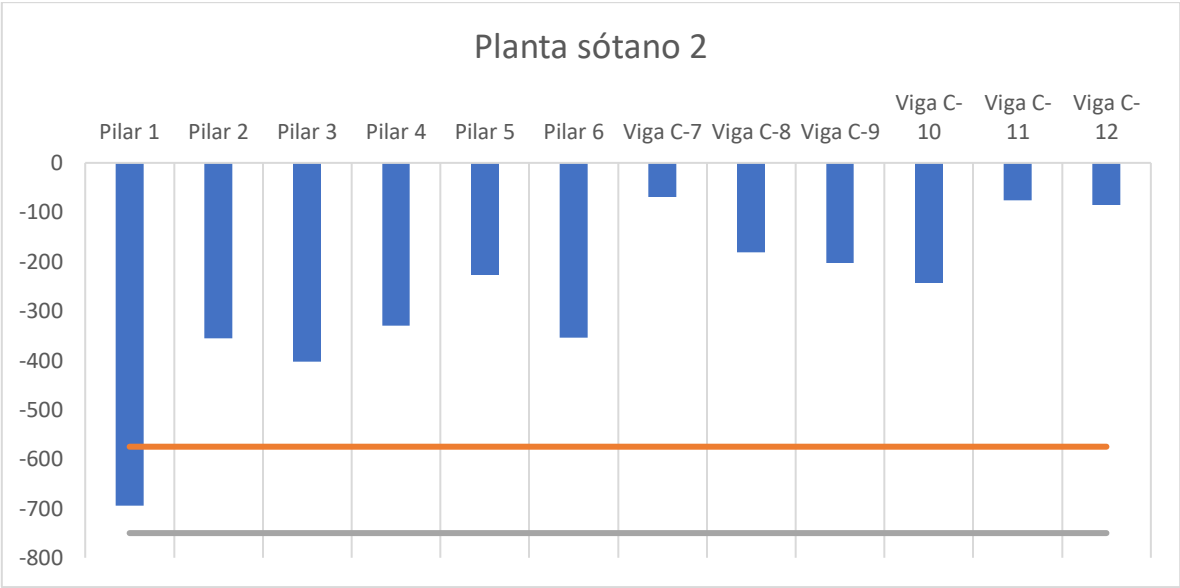


Figura 33. Potencial de corrosión en planta sótano -2

Los límites de referencia para este análisis se basaron en las especificaciones establecidas por la Norma ASTM C876-15, donde se establece que para un riesgo de corrosión bajo se deben obtener valores de -575 mV o superiores en escala negativa, un riesgo moderado corresponde a valores entre -575 mV y -750 mV y finalmente un riesgo alto de corrosión corresponde a valores inferiores en escala negativa de -750 mV.

Al examinar el diagrama correspondiente a los valores obtenidos en el sótano -1 (Figura 32), se identifican valores con riesgo moderado, especialmente en el caso de los pilares 1 y 6, los cuales están más próximos a experimentar una corrosión elevada. En la Figura 33, que representa los valores del sótano -2, se destaca que el pilar 1 es el elemento más afectado por la corrosión.

Los análisis efectuados sobre los materiales, en consonancia con la campaña de ensayos de información que incorpora ultrasonidos y probetas-testigo, revelan que la homogeneidad del hormigón en la estructura del estadio es relativamente uniforme, pero se sitúa por debajo de los estándares especificados en el Proyecto. La resistencia estimada del hormigón en los pilares, denotada como $f_{ck,est}$, alcanza los 15,2 N/mm² (aproximadamente 155 kg/cm²), mientras que, en las vigas, se estima en $f_{ck,est} = 17,7$ N/mm² (alrededor de 180 kg/cm²). En contraste, la resistencia proyectada para todos los elementos constructivos de hormigón armado (excluyendo cimentación y muros de contención de hormigón en masa) es $f_{ck,est} = 210$ kg/cm² (aproximadamente 20,6 N/mm²). Cabe señalar que la resistencia mínima estipulada por la EH-68 era de 120 kg/cm², mientras que las resistencias comúnmente aceptadas en edificación y obra pública oscilaban generalmente entre 150 y 250 kg/cm². Según datos de proyecto, el acero empleado en todas las armaduras se trata de un acero A46 cuyo límite elástico es de aproximadamente 450 Mpa.

Una vez estimado el estado general de la estructura, se llevó a cabo un recálculo de esta en el que se introdujeron, en un modelo de cálculo realizado mediante elementos finitos (Figura 34) tanto las características actualizadas de los materiales como las acciones previstas en el Código Técnico de la Edificación^[43]. El cálculo

realizado, así como las condiciones de durabilidad observadas hicieron necesarios la reparación y el refuerzo de la estructura.

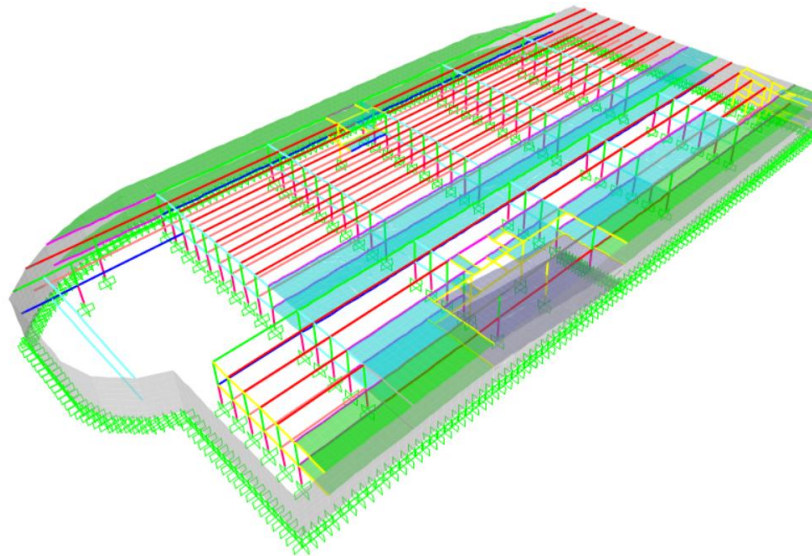


Figura 34. Modelo de elementos finitos^[44]

La rehabilitación de esta estructura incluyó la intervención en los forjados superior e inferior, los pilares de las plantas superior e inferior, las zonas de contenedores, cimentaciones y muro perimetral.

Para la intervención del forjado superior, se dispuso una losa de recrecido de 12 cm continua en toda la superficie, dando así una solución que disminuyó la deformabilidad del forjado. El armado de la losa se dispuso en ambas direcciones, para la dirección x se emplearon armaduras de $\Phi 25/10$ hasta los 2.5 m a cada lado en las zonas cercanas a la alineación de pilares y con armaduras de $\Phi 25/20$ desde los 2.5 hasta los 5.0 m a cada lado de los pilares. Para la dirección Y, las armaduras fueron de $\Phi 16/20$. Este recrecido se conectó a esfuerzo rasante a la losa existente mediante conectores metálicos dispuestos en las zonas críticas.

Se repararon todos los pilares de la planta superior, saneando mediante hidrodemolición el hormigón desprendido, limpiando el óxido de las armaduras (y reponiéndolas cuando el daño era elevado), para posteriormente aplicar una pintura de pasivación a la armadura y reponer el hormigón eliminado mediante un mortero de reparación. Además, se reforzaron aquellos pilares de la planta superior que

requerían esta acción por motivos estructurales mediante un recrecido moderado. Este recrecido consistió en agregar un espesor de 8cm en cada lado, con armaduras longitudinales por mínimos y con estribos de $\Phi 10/10$.

Para el forjado inferior, se realizó una intervención en las vigas anexas al pasillo central y las vigas anexas al pasillo de continuación de rampas, las cuales requirieron un refuerzo mediante CFRP con bandas tipo Sika CarboDur E812 con un ancho de 80 mm cada una de ellas y un espesor de 1.2mm dispuestas en los 7m centrales de cada una de las vigas.

En los pilares ubicados en la planta inferior, se requirió el uso de refuerzo a base de recrecido de la forma que muestra la Figura 35.

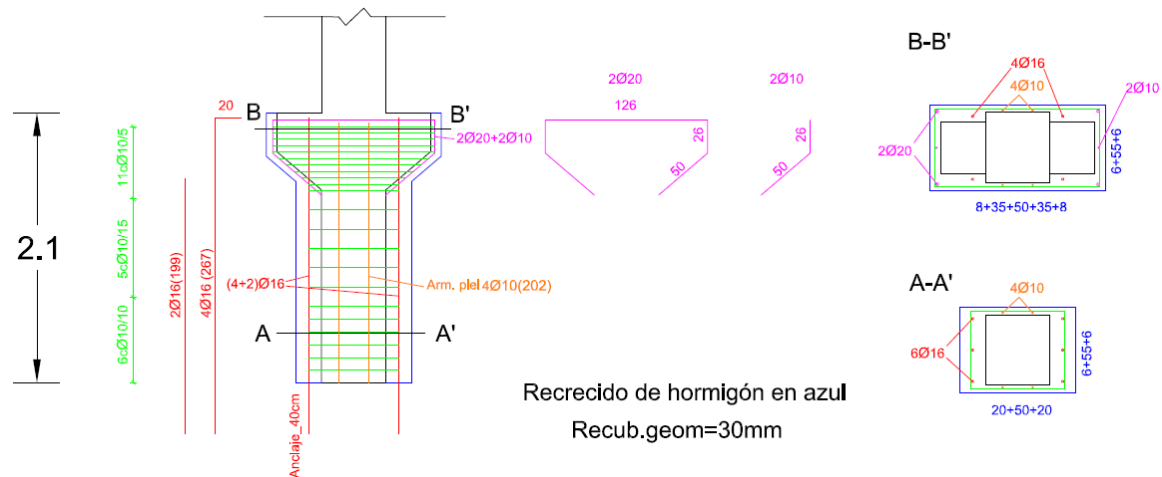


Figura 35. Recreido para pilares en planta inferior. Fuente: Anejo de rehabilitación de estructuras de la Plaza de la Reina [44]

Para la cimentación, se propuso una solución en la que se unían estructuralmente algunos encepados contiguos, aprovechando la su resistencia sobrante de algunos de ellos para suplir las carencias de otros que se encontraban más solicitados.

1.2. PLAN DE MONITORIZACIÓN

La monitorización del aparcamiento subterráneo fue realizada por la empresa Calsens. Se dividió en dos partes importantes, la primera fue la monitorización de los parámetros de durabilidad, para la cual se contó con la participación del Instituto

de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Por otro lado, Calsens llevó a cabo la monitorización del comportamiento estructural.

Para llevar a cabo la monitorización total se emplearon sensores que se desarrollaron por las mismas empresas. Los sensores que empleó CalSens están basados en la tecnología de Fibra óptica.

1.3. MONITORIZACIÓN DE PARAMETROS DE DURABILIDAD

Bajo las premisas anteriores de tipos de elementos y tipo de degradación encontrada, **Calsens**, junto con el **Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja**, realizaron la selección de las zonas críticas de la estructura y se determinaron las zonas de colocación de la monitorización para el seguimiento de la corrosión de la estructura.

Se estimaron 4 zonas en cada planta, en tres de ellas se monitorizo la corrosión en un pilar, una viga y el forjado mientras que en una de ellas solo se monitorizo la corrosión y temperatura en un pilar, variable importante para seguir la cinética del proceso de corrosión. A continuación, podemos observar las zonas de monitorización y sus sensores en la planta de arriba y abajo (-1 y -2) ubicado aproximadamente a un tercio central del elemento.

Los sensores se instalaron en la armadura original para llevar a cabo la reparación y rehabilitación de la estructura en donde se detectaron deterioros significativos. Se llevó a cabo la monitorización de una muestra representativa de cada tipo de elemento estructural como soportes de cada planta, vigas de carga forjado y losas de forjado. En total se instalaron 20 sensores para la obtención de parámetros de durabilidad dispuestos de la siguiente manera (ver Figura 37 y Figura 38):

- 10 sensores en cada planta (-1 y -2):
 - 4 sensores en soportes
 - 3 sensores en vigas
 - 3 sensores en losas de forjado

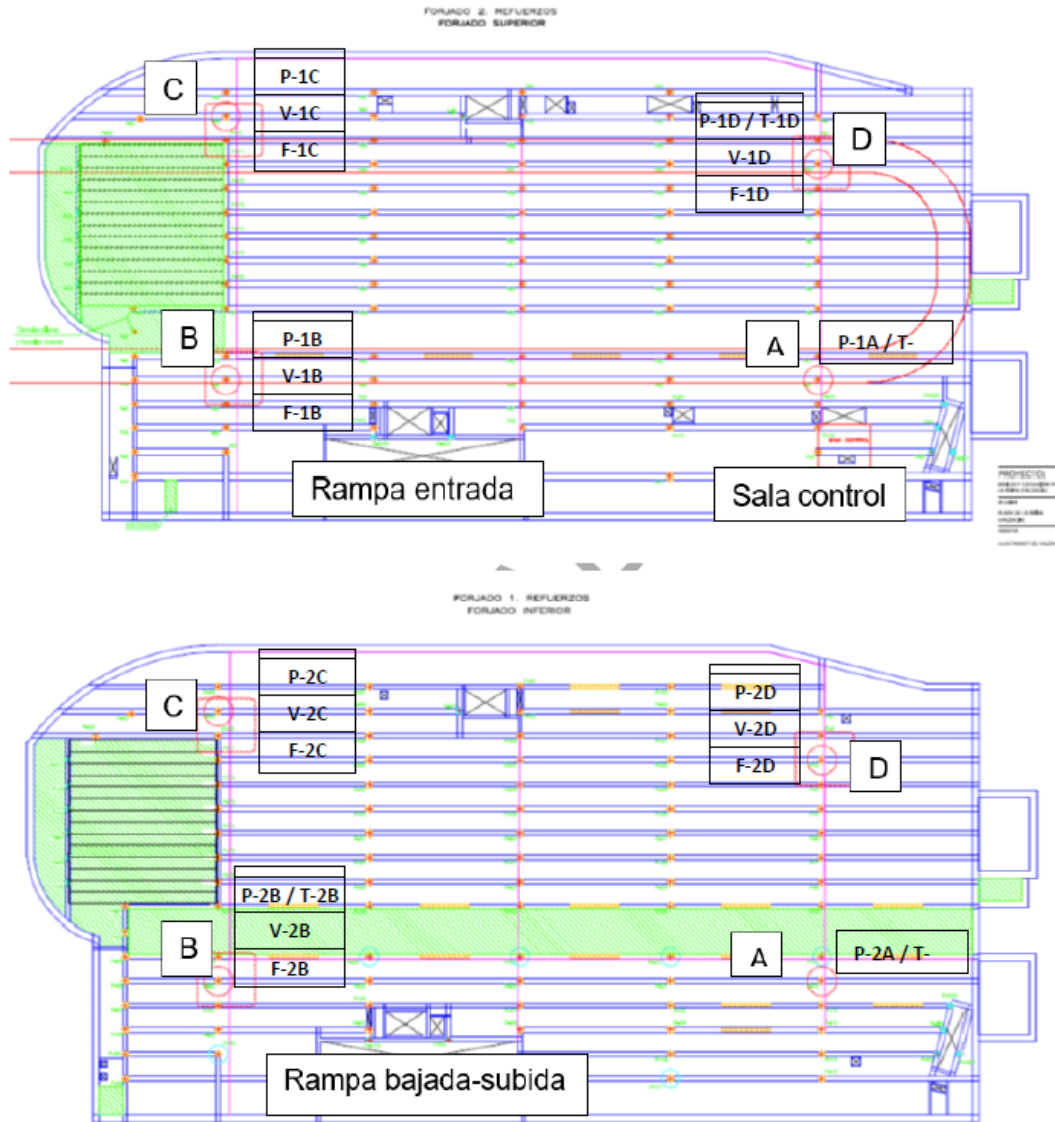


Figura 36. Localización de los sensores. Arriba -1 y abajo -2

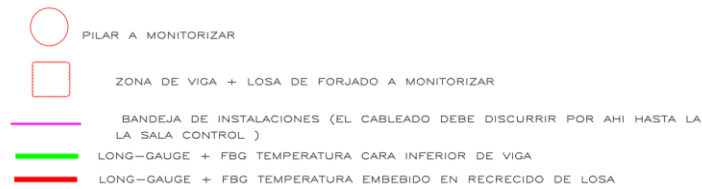


Figura 37. Leyenda de sensores y cableado de croquis

En total se instalaron 20 sensores, que ocupan 24 canales de registro, 20 canales para la medida de parámetros electroquímicos y 4 canales para la medida de la temperatura. La referencia de cada sensor de corrosión y temperatura instalado junto con su localización para la monitorización del aparcamiento se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3. Referencia de sensores instalados por el IETcc

Referencia de sensor	Localización	Elemento	Tipo sensor	Longitud de cable a caseta de control (m)
P-1A / T-1A	Planta -1	Pilar	Corrosión / Temperatura	33.4
P-1B	Planta -1	Pilar	Corrosión	113.8
V-1B	Planta -1	Viga	Corrosión	113.3
F-1B	Planta -1	Forjado	Corrosión	113.3
P-1C	Planta -1	Pilar	Corrosión	139.6
V-1C	Planta -1	Viga	Corrosión	139.1
F-1C	Planta -1	Forjado	Corrosión	139.1
P-1D / T-1D	Planta -1	Pilar	Corrosión / Temperatura	59.4
V-1D	Planta -1	Viga	Corrosión	58.9
F-1D	Planta -1	Forjado	Corrosión	58.9
P-2A / T-2A	Planta -2	Pilar	Corrosión / Temperatura	36.4
P-2B / T-2B	Planta -2	Pilar	Corrosión / Temperatura	116.8
V-2B	Planta -2	Viga	Corrosión	116.3
F-2B	Planta -2	Forjado	Corrosión	116.3
P-2C	Planta -2	Pilar	Corrosión	142.6
V-2C	Planta -2	Viga	Corrosión	142.1

F-2C	Planta -2	Forjado	Corrosión	142.1
P-2D	Planta -2	Pilar	Corrosión	62.4
V-2D	Planta -2	Viga	Corrosión	61.9
F-2D	Planta -2	Forjado	Corrosión	61.9

Donde:

- P: Pilar
- V: Viga
- F: Forjado
- -1: Numero de planta -1
- -2: Numero de planta -2
- A: zona más cercana a la sala de control
- T: Sensor de temperatura



Figura 38. Localización de sensor de corrosión en forjado, viga y pilar

Los sensores electroquímicos empleados en la toma de medidas se fabrican en el Instituto Eduardo Torroja y se han diseñado para el uso tanto en una estructura en construcción como en una existente. Estos sensores se han diseñado para que sean compatibles con la estructura y posean una elevada durabilidad. Los sensores permiten medir de forma precisa y fiable el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la temperatura.



Figura 39. Sensor instalado en elemento

1.4. MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

CalSens fue el encargado de realizar la selección de las zonas críticas de la estructura y se determinó la disposición de los sensores de la monitorización para el control del comportamiento estructural del aparcamiento subterráneo.

Para la monitorización de los parámetros de durabilidad y comportamiento estructural en servicio de la estructura de hormigón armado del aparcamiento tras la rehabilitación se empleó un sistema híbrido que conjuga las ventajas de la tecnología fotónica y piezoeléctrica.

Se contemplo la instalación de sensores específicos para los parámetros de durabilidad como lo son el potencial de corrosión (E_{corr}), la resistividad (ρ), la velocidad de corrosión (I_{corr}) y la temperatura del elemento (T).

Para la monitorización del comportamiento estructural, se realizó la monitorización de dos vigas (una en cada forjado) donde se planteó el uso de sensores de fibra óptica tipo long-gauge, los cuales fueron empleados en la prueba de carga también.

Su principal funcionamiento está basado en la tecnología de las FBGs, también permite ser compensado térmicamente y conectados en serie. El cableado de fibra óptica empleado para la unión de los sensores con los equipos informáticos es de fibra óptica monomodo, con un recubrimiento de acrilato y protección de 3mm con fibra de aramida en su interior.

Para la adquisición y registro específico de lectura de este tipo de sensores se emplearon tarjetas de adquisición piezoeléctricas las cuales están especialmente diseñadas para este tipo de dispositivos. Los sensores se conectan mediante un cable de alta IP y durabilidad con el equipo de toma de datos. El equipo se encuentra conectado a un ordenador con conexión a internet. Todo el sistema se encuentra alojado en un rack con alimentación eléctrica a 200V y conexión wifi.

El sistema óptico de adquisición de datos consiste en un interrogador estático de sensores ópticos basados en FBGs. El software informático de adquisición de resultado es capaz de representar en tiempo real el valor de las magnitudes instrumentos y el envío automatizado de alarmas vía SMS o mail por superación de umbrales previamente establecidos.

Se instalaron 3 sensores de deformación de Longitud + Temperatura colocados de manera perpendicular a la dirección de la flexión. Estos se encargan de monitorizar una viga en el forjado superior de cubierta y una viga en el forjado inferior, instrumentando las deformaciones en el centro de luz por la cara inferior de la viga (máximos momentos positivos) y las deformaciones en la losa del recredido colaborante (máximos negativos).



Figura 40. Sensor de deformación long- gauge emplazado

1.5. RESULTADOS

Para la obtención de los datos de la monitorización, inicialmente se realizó una adquisición de datos de referencia de los sensores ya instalados. Obteniendo así las siguientes medidas referentes al potencial de corrosión; E_{corr} (V) vs MnO_2 .

Tabla 4. Valores iniciales de E_{corr} vs MnO_2 por sensor

Ref. Sensor	E_{corr} (V) vs MnO_2
P-1A/T1A	-0,303
P-1B	-0,331
V-1B	-0,297
F-1B	-0,326
P-1C	-0,219
V-1C	-0,407
F-1C	-0,374
P-1D/T-1D	-0,396
V-1D	-0,290

F-1D	-0,391
P-2A/T-2A	-0,397
P-2B/T-2B	-0,399
V-2B	-0,317
F-2B	-0,411
P-2C	-0,351
V-2C	-0,323
F-2C	-0,331
P-2D	-0,409
V-2D	-0,338
F-2D	-0,323

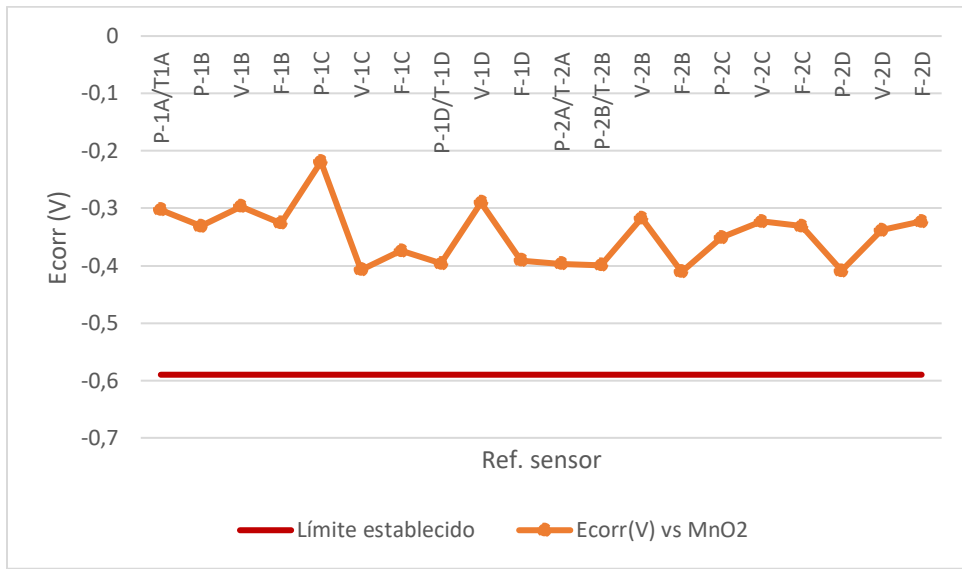


Figura 41. Valores iniciales de potencial de corrosión en los elementos monitorizados



Figura 42. Sensor instalado en pilar en la planta -2 zona A

Adicionalmente, se obtuvieron los valores de potencial de corrosión y velocidad de corrosión entre los meses de abril y julio; los cuales se encuentran estrechamente relacionados entre sí. A continuación, se observan los datos recopilados de acuerdo con las posiciones, las cuales se referencian en la Tabla 4.

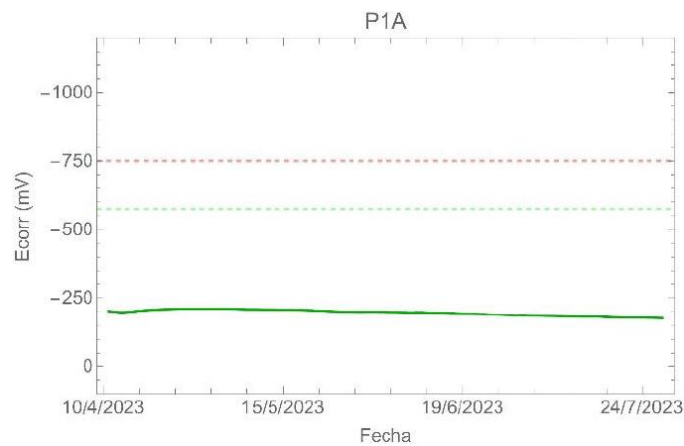


Figura 43. Potencial de corrosión P-1A

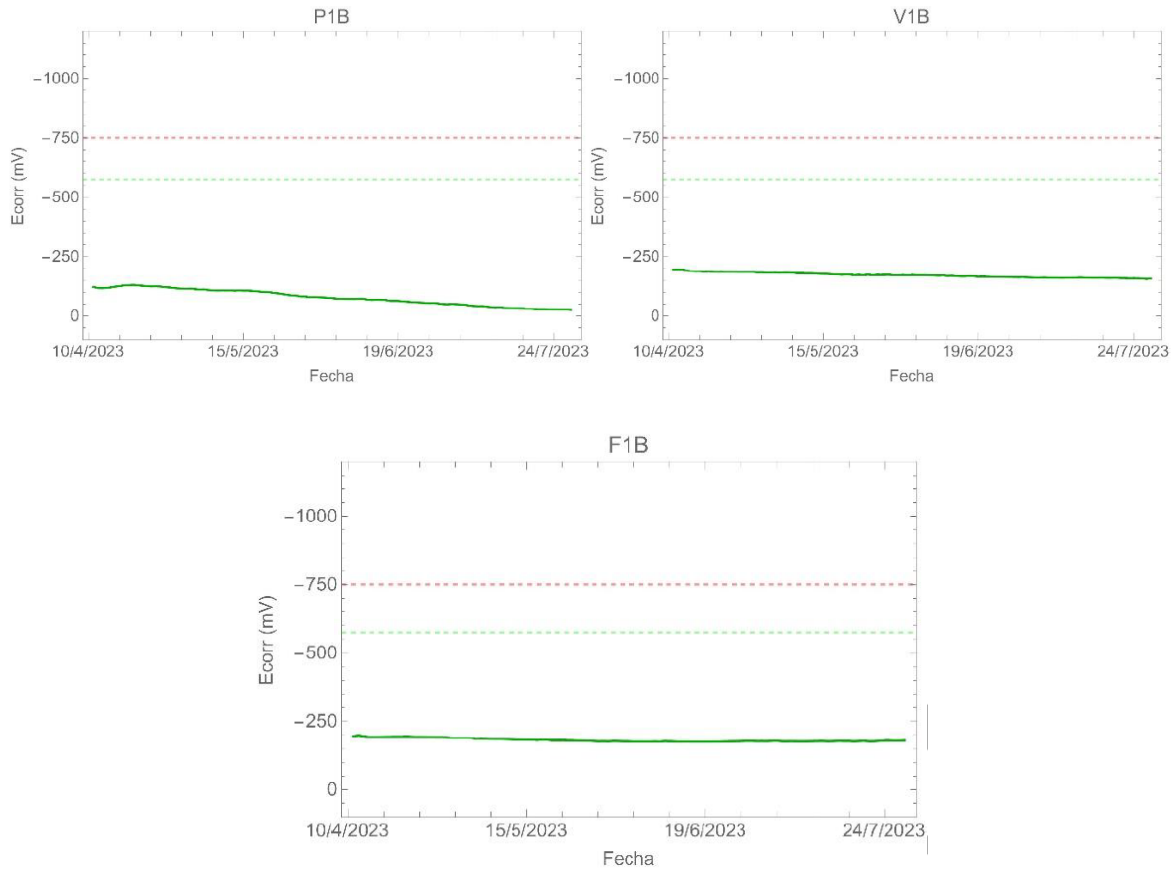
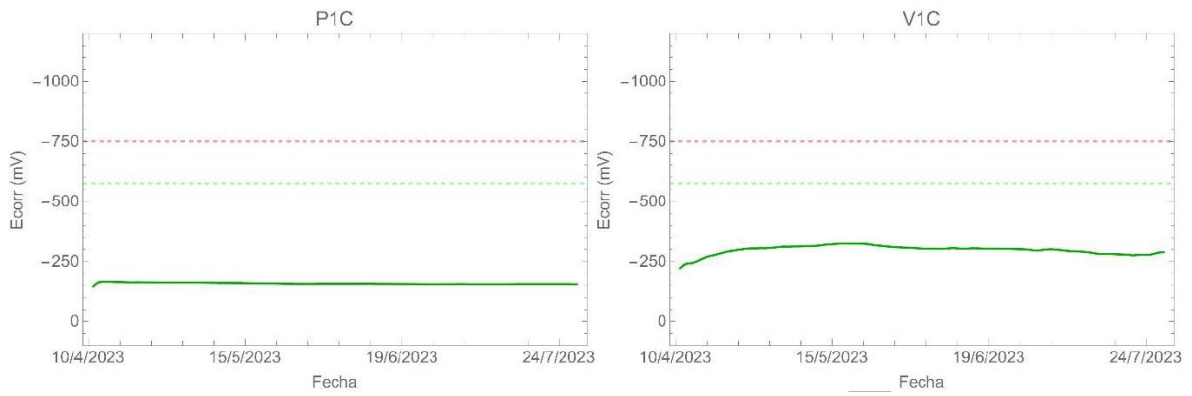


Figura 44. Potencial de corrosión P-1B, V-1B, F-1B



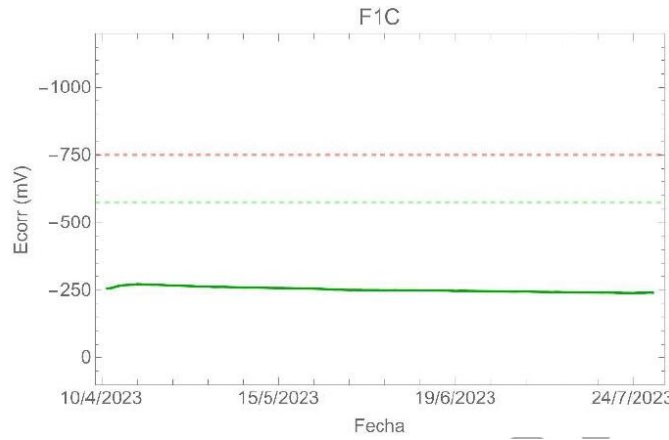


Figura 45. Potencial de corrosión P-1C, V-1C, F-1C

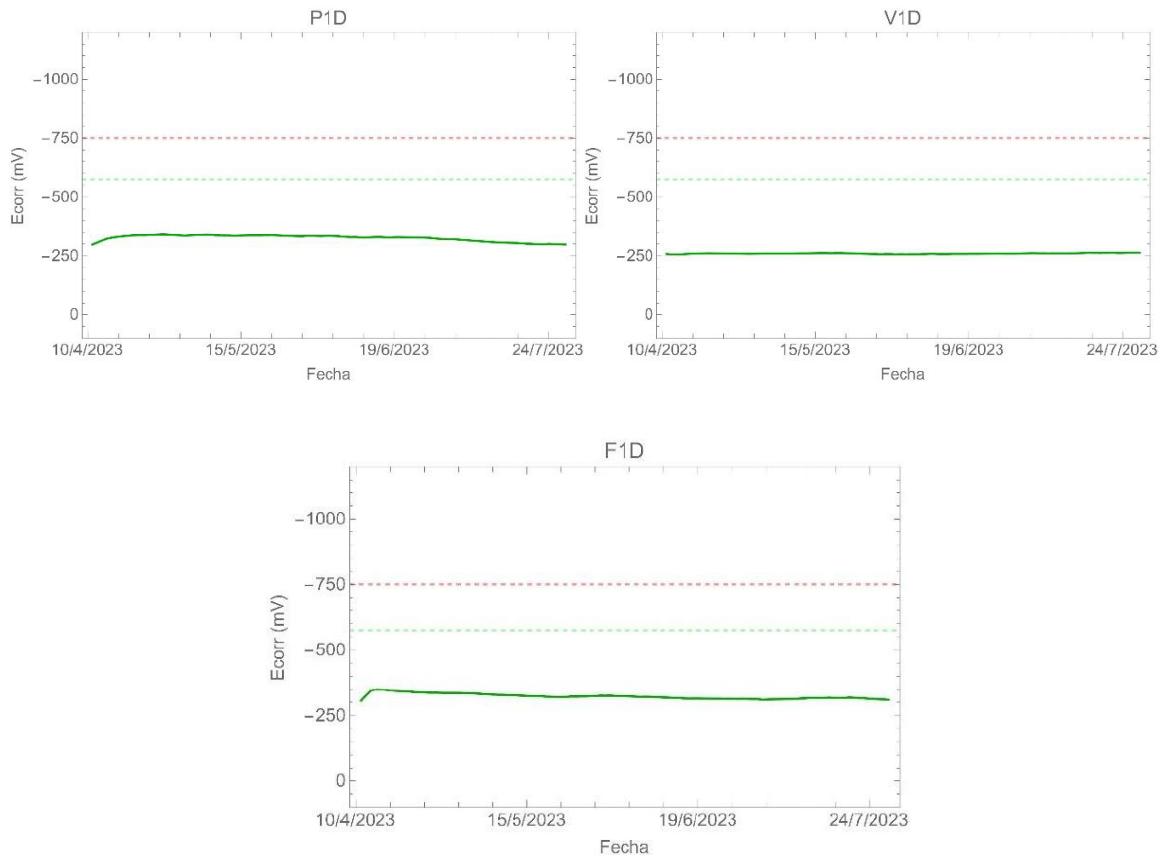


Figura 46. Potencial de corrosión P-1D, V-1D, F-1D

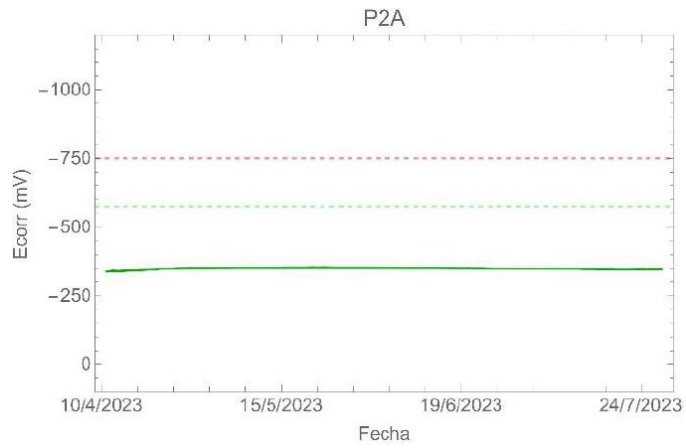


Figura 47. Potencial de corrosión P-2^a

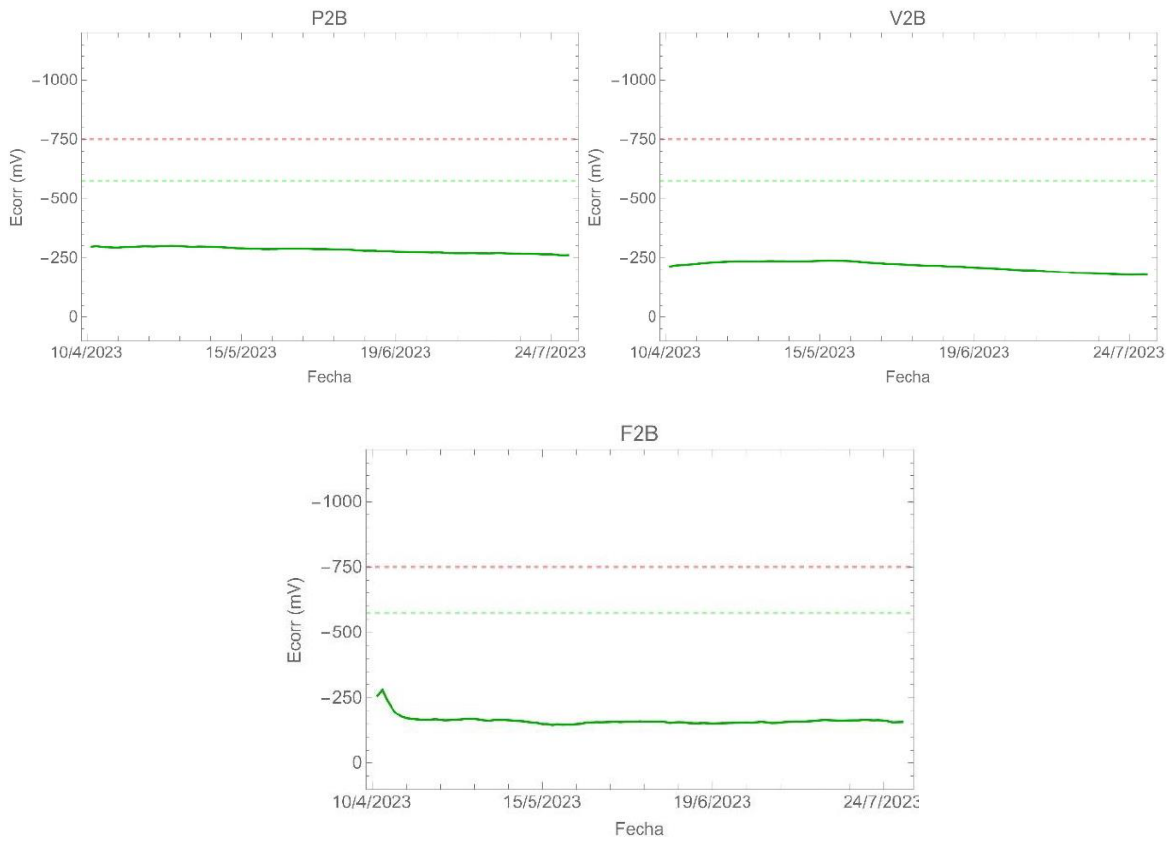


Figura 48. Potencial de corrosión P-2B, V-2B, F-2B

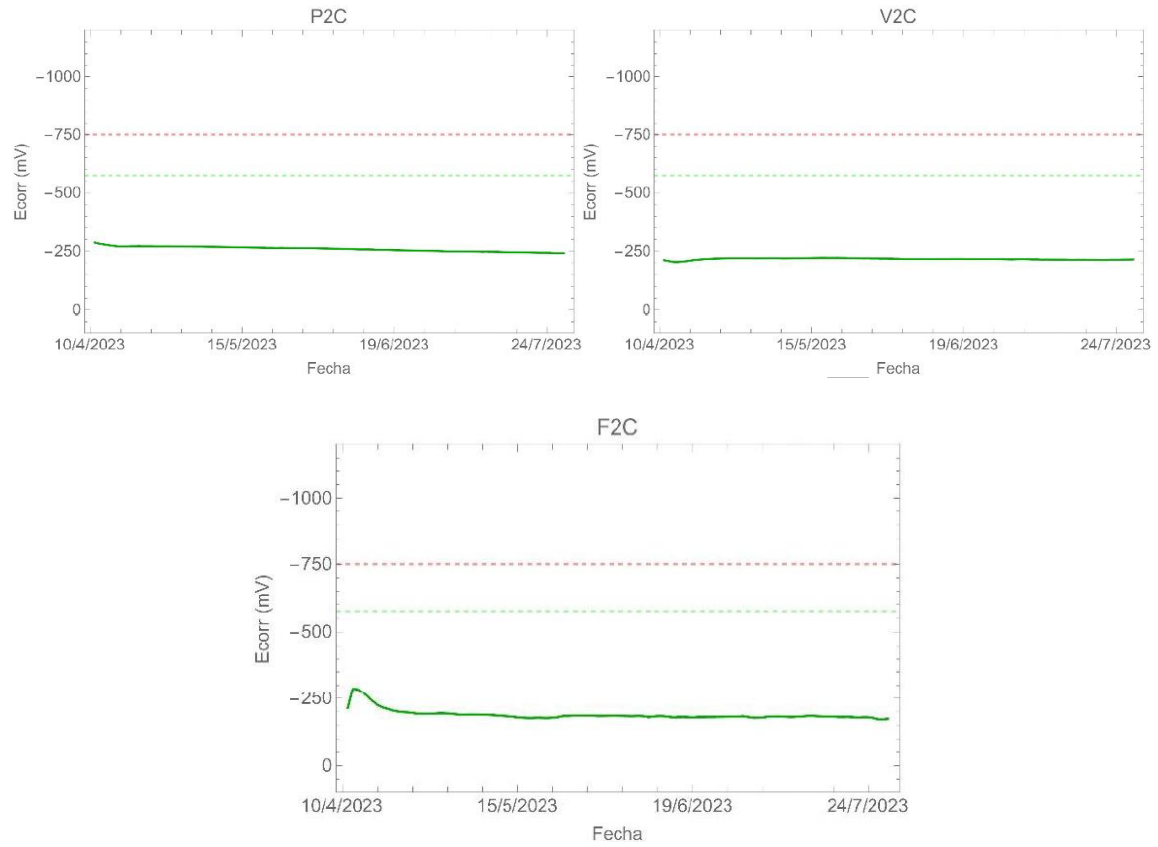
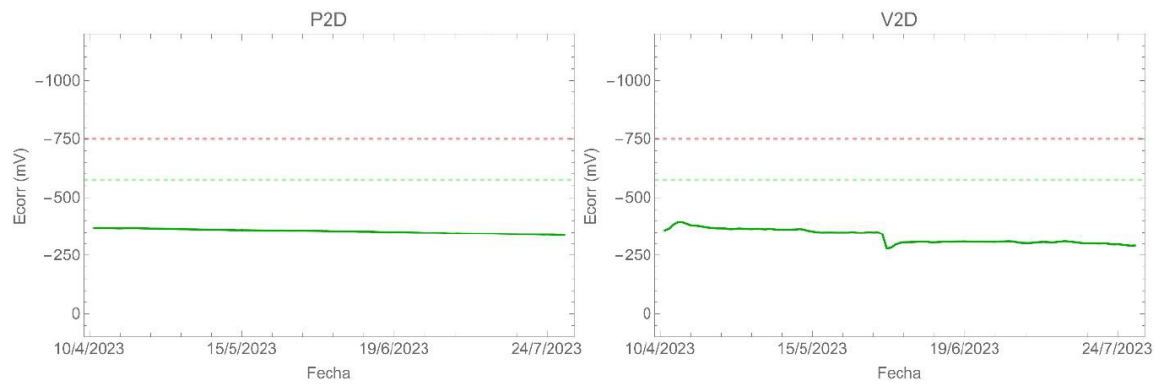


Figura 49. Potencial de corrosión P-2C, V-2C, F-2C



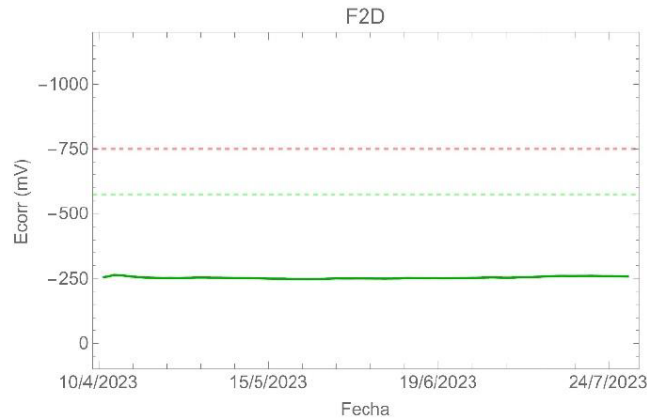


Figura 50. Potencial de corrosión P-2D, V-2D, F-2D

Los valores observados en las figuras anteriores nos muestran la fluctuación de potencial de corrosión que han tenido los elementos desde el 10 de mayo de 2023 hasta el 24 de julio del mismo año. Según la normativa ASTM C876-15 ^[45] para evaluar el potencial de corrosión del acero de refuerzo en el concreto se establecen tres límites/umbrales a los cuales se hace referencia en el apartado 4.3. Límites establecidos. Para este caso de estudio, los elementos apenas presentan variaciones de potencial de corrosión debido a su tendencia constante adicionalmente no superan el primer umbral fijado en -575 mV encontrándose en un riesgo bajo de corrosión tal y como lo indican los límites establecidos por la normativa.

Al examinar las gráficas de temperatura derivadas de la monitorización, se evidencia una notable estabilidad térmica, caracterizada por la ausencia de fluctuaciones significativas. De manera significativa, se ha identificado una correlación directa entre la temperatura y el potencial de corrosión. En términos técnicos, se puede afirmar que un aumento en la temperatura conlleva a una reducción en el potencial de corrosión, y viceversa, estableciendo así una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros.

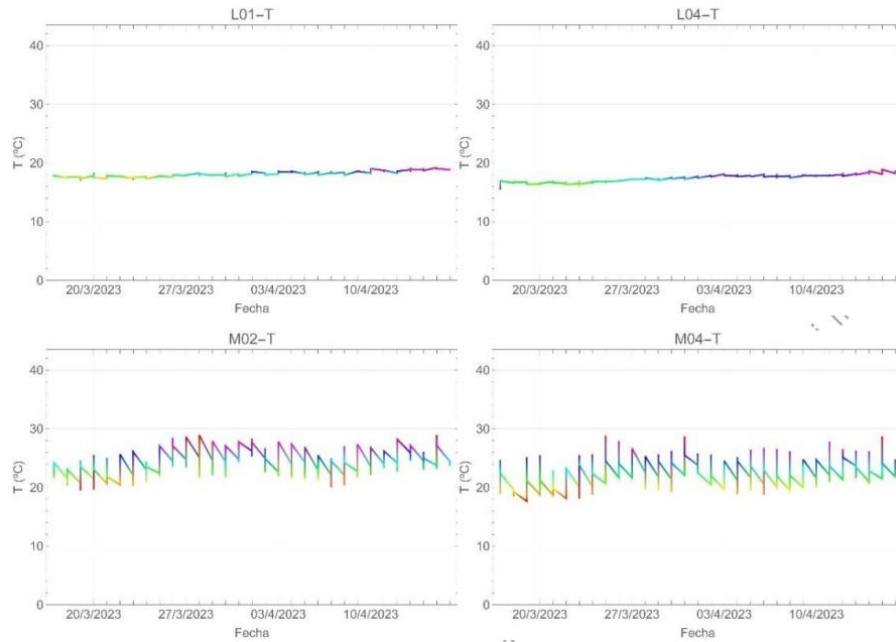


Figura 51. Temperaturas obtenidas para elementos monitorizados para potencial de corrosión

Referente a la velocidad de corrosión, se obtuvieron los siguientes resultados:

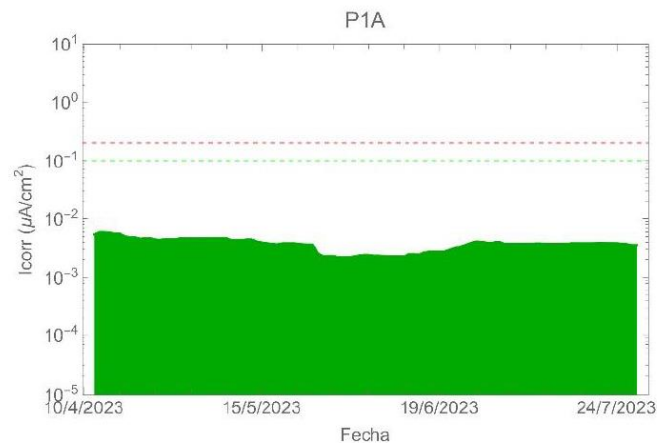


Figura 52. Velocidad de corrosión P-1ª

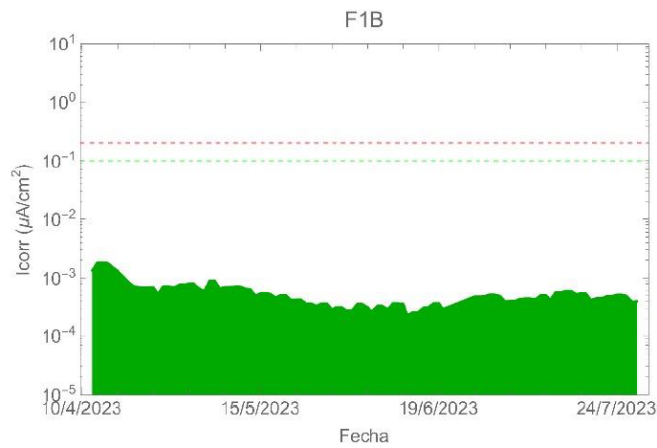
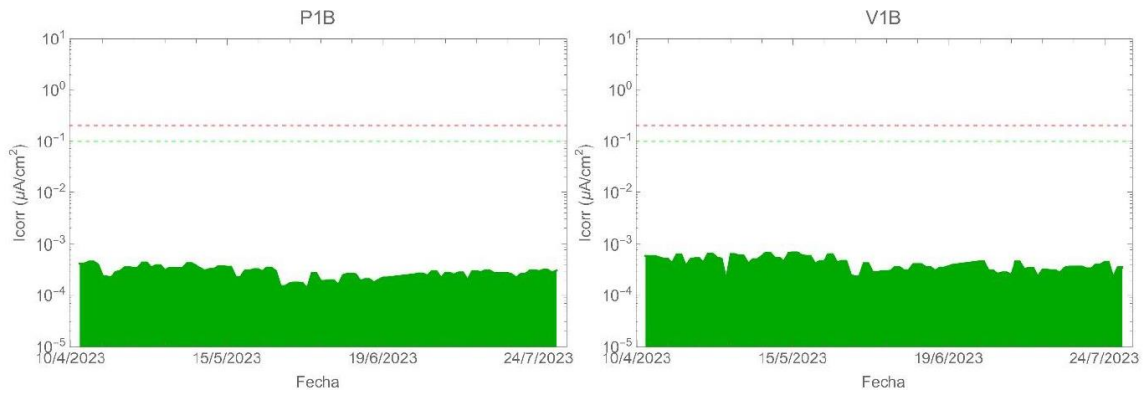
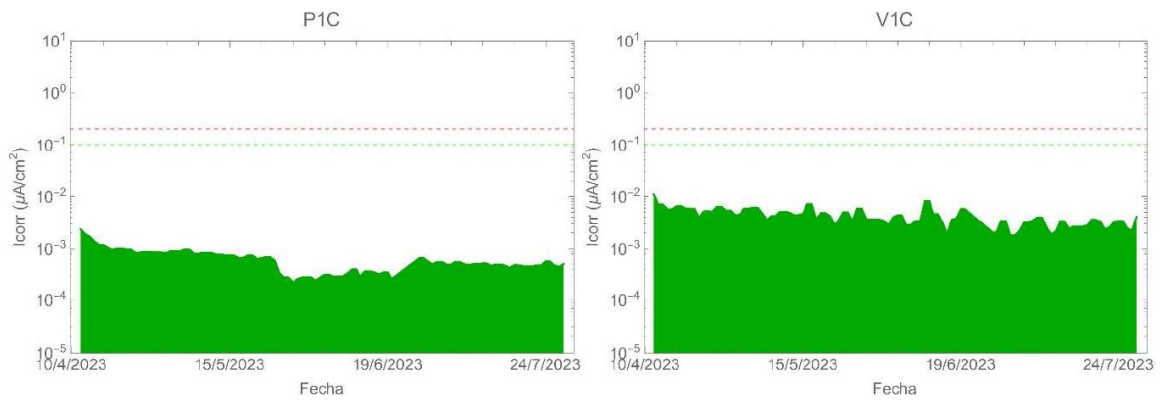


Figura 53. Velocidad de corrosión P-1B, V-1B, F-1B



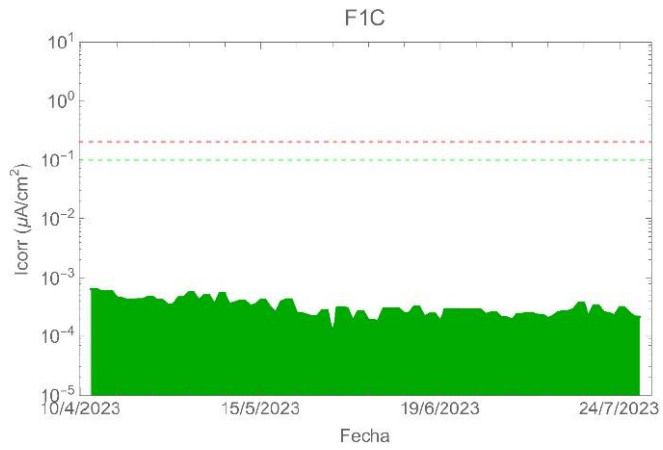


Figura 54. Velocidad de corrosión P-1C, V-1C, F-1C

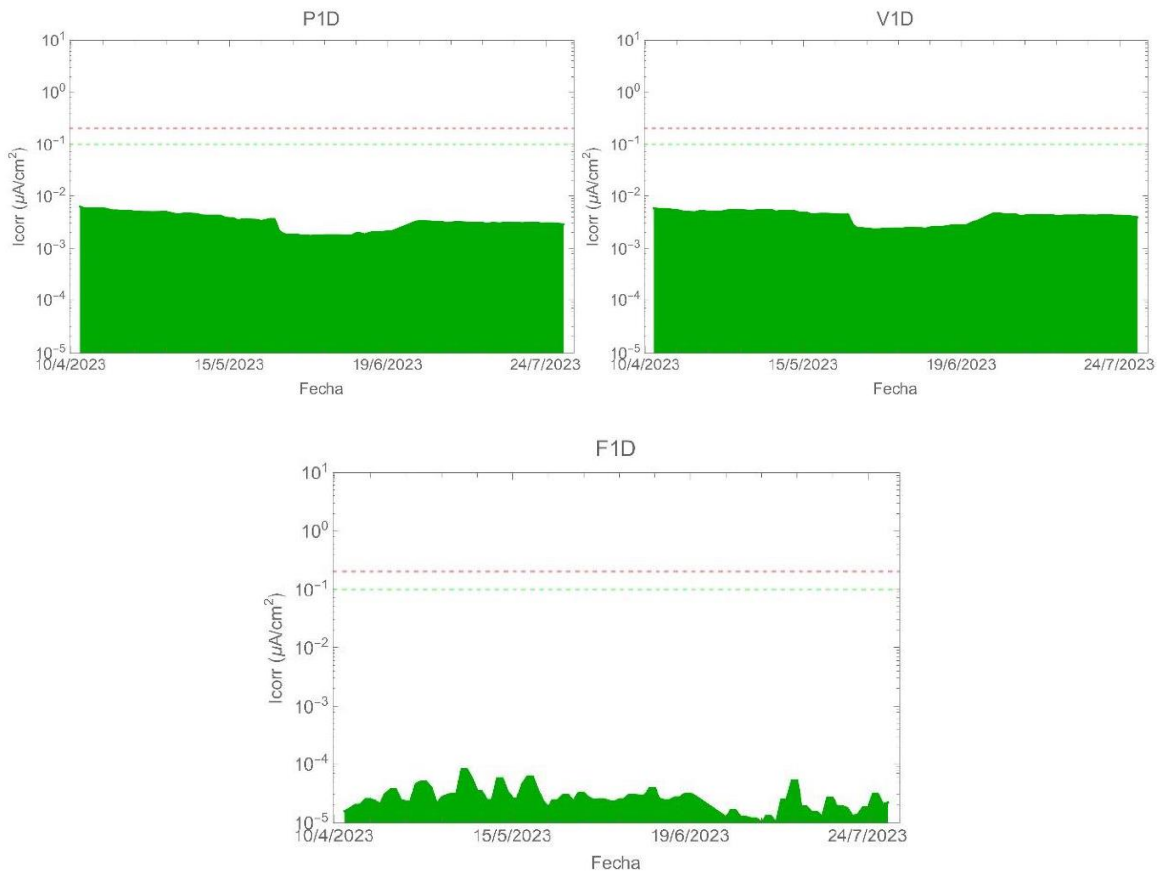


Figura 55. Velocidad de corrosión P-1D, V-1D, F-1D

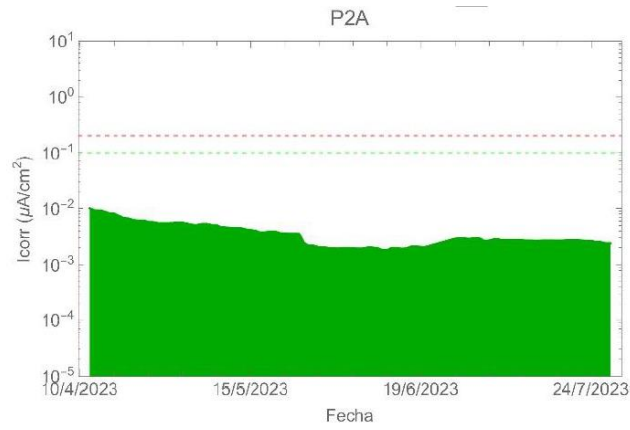


Figura 56. Velocidad de corrosión P-2A

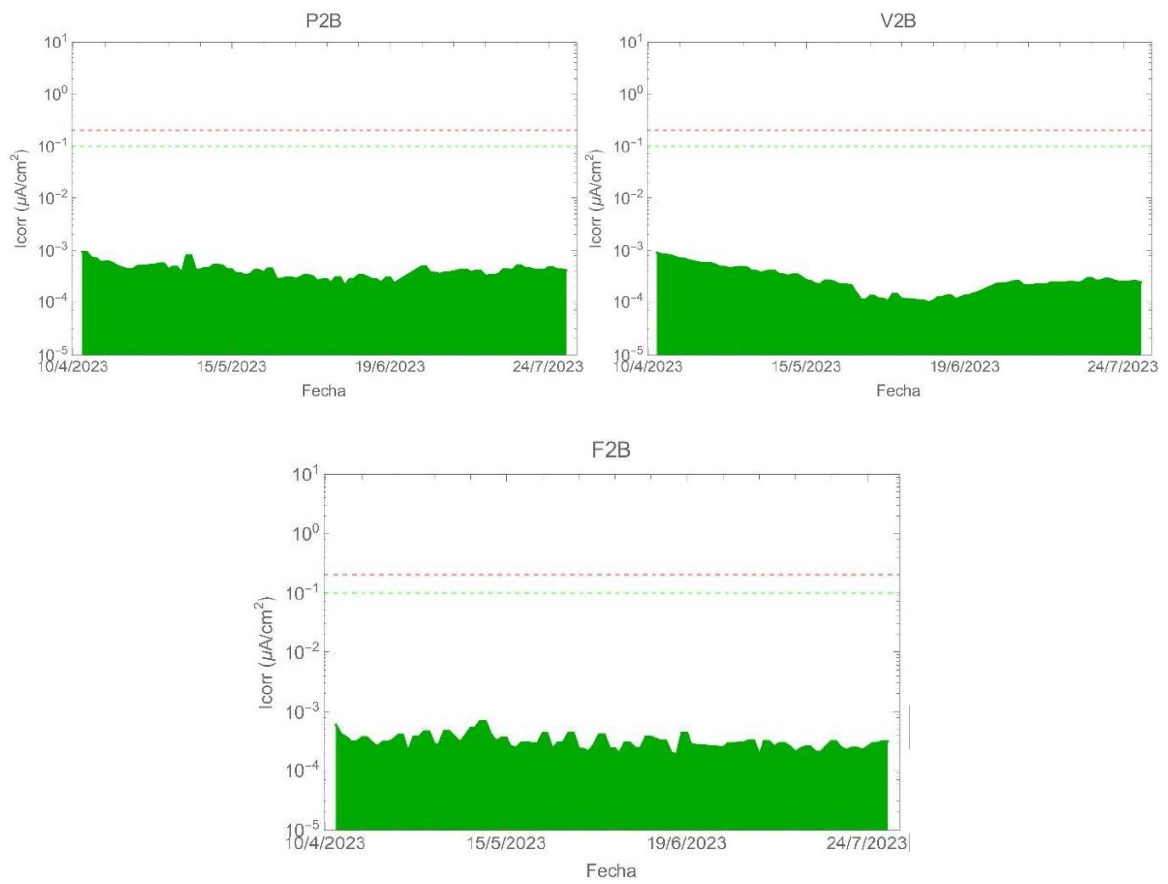


Figura 57. Velocidad de corrosión P-2B, V-2B, F-2B

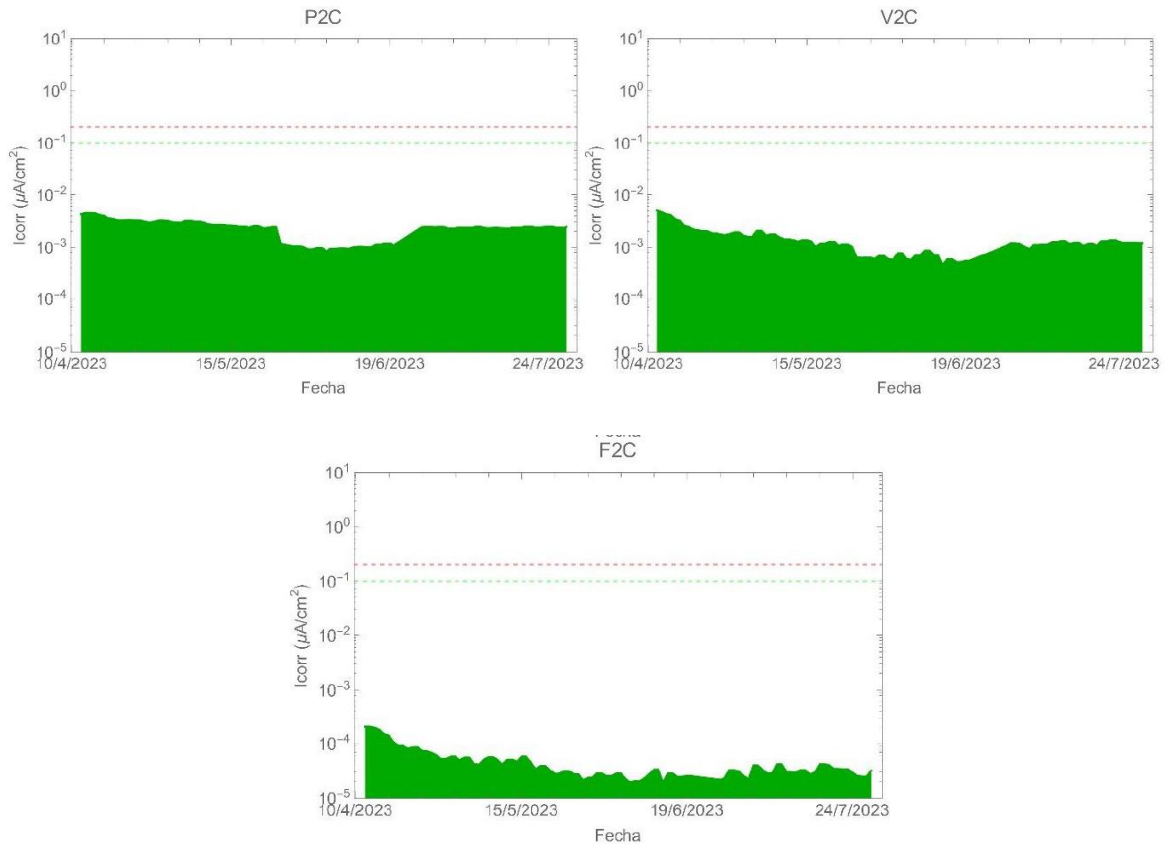
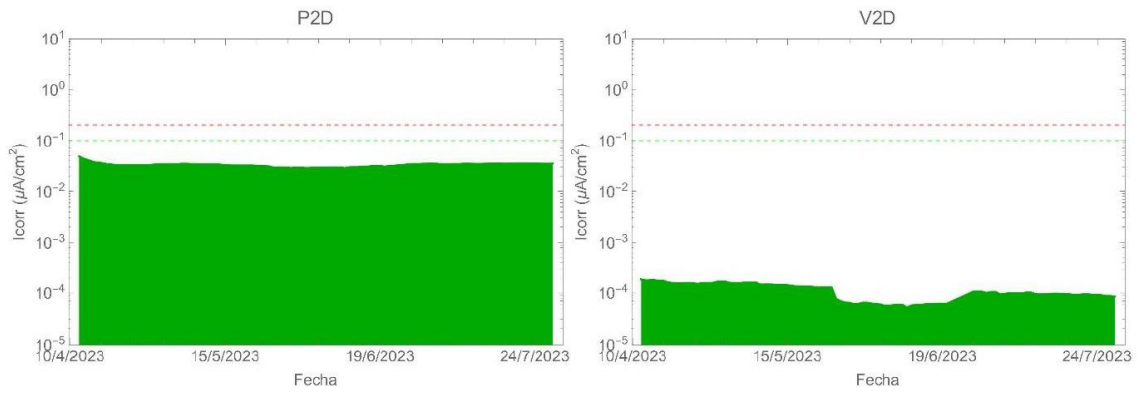


Figura 58. Velocidad de corrosión P-2C, V-2C, F-2C



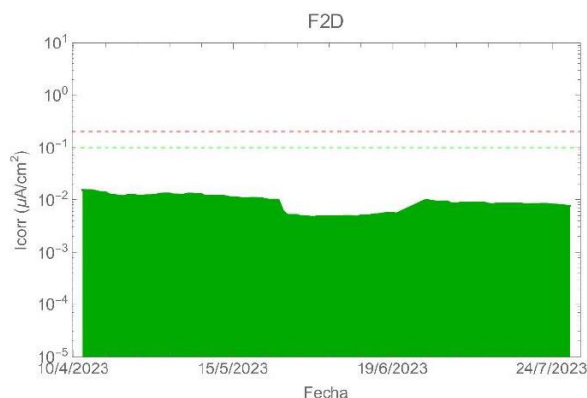


Figura 59. Velocidad de corrosión P-2D, V-2D, F-2D

Para la interpretación de estos resultados, la norma ISO 12696:2022 ^[46] especifica los procedimientos electroquímicos destinados a la evaluación de la corrosión del acero dentro del hormigón. Esta norma proporciona directrices detalladas sobre la medición de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas, incluida la técnica de polarización lineal.

En ciertos contextos y ubicaciones específicas, se ha establecido un umbral comúnmente aceptado para la velocidad de corrosión de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este valor representa el punto en el cual la velocidad de corrosión se considera críticamente elevada, indicando la necesidad de intervención o mantenimiento en el elemento correspondiente.

Al analizar los valores obtenidos de la monitorización encontramos que algunos sufren variaciones significativas entre sí como en el caso de los sensores F-1D, F-1D ubicados en la planta -1 del aparcamiento y los sensores F-2C, V-2D de la planta -2 de la estructura; esto puede deberse a la influencia de la temperatura, humedad relativa entre otras condiciones a las cuales se pueden ver expuestos estos elementos. Cabe resaltar que, a pesar de estar variaciones, ningún elemento excede los límites establecidos por normativa, indicando que todos ellos se mantienen en un estado pasivo sin evidencia de corrosión significativa.

Las fluctuaciones en la velocidad y el potencial de corrosión se explican por las variaciones en las temperaturas experimentadas por la estructura durante el

proceso de monitoreo. Esto se refleja en la Figura 60, donde se presentan los datos de temperatura para los elementos bajo observación.

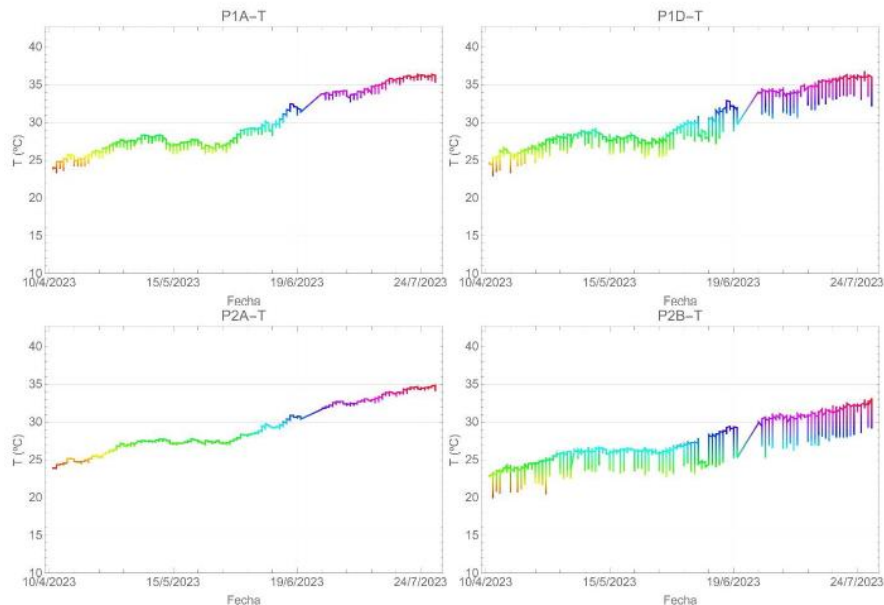


Figura 60. Temperaturas obtenidas para elementos monitorizados

Al llevar a cabo un estudio de correlación, se ha identificado una relación significativa entre la temperatura y los parámetros de corrosión, es decir, la velocidad y el potencial de corrosión. Los resultados indican que a medida que las temperaturas se incrementan, se experimenta una disminución notable en la velocidad y el potencial de corrosión. Este hallazgo sugiere que las condiciones de temperatura juegan un papel crucial en la resistencia de la estructura a la corrosión, ya que temperaturas más altas parecen estar asociadas a un menor riesgo de corrosión o a una menor tasa de corrosión tal y como se aprecia en la Figura 61.

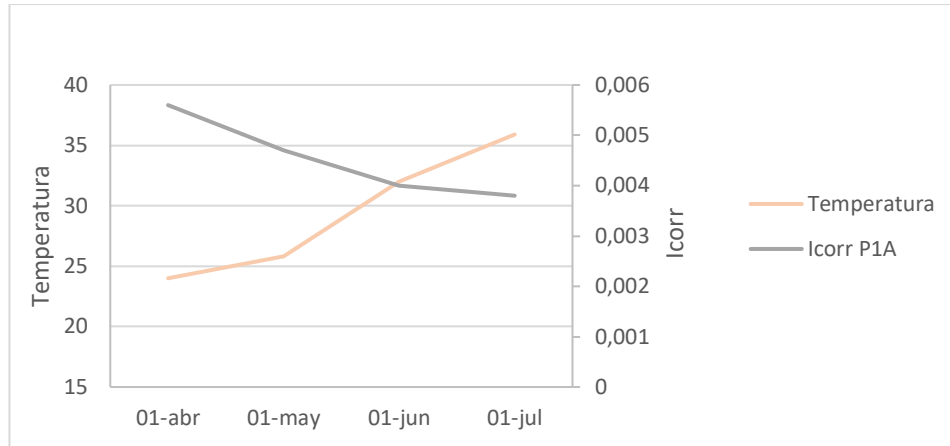


Figura 61. Evolución de la temperatura vs velocidad de corrosión en P-1ª

Se elaboró un Diagrama de Evans por fecha (Figura 62, 63 y 64) para resumir y representar gráficamente los datos recopilados sobre el potencial y la velocidad de corrosión durante el periodo de abril a julio. Las figuras resultantes proporcionan una visualización del comportamiento de todos los elementos analizados, y a partir de esta representación, se ha llegado a la conclusión de que ninguno de ellos supera los límites normativos establecidos en relación con la corrosión.

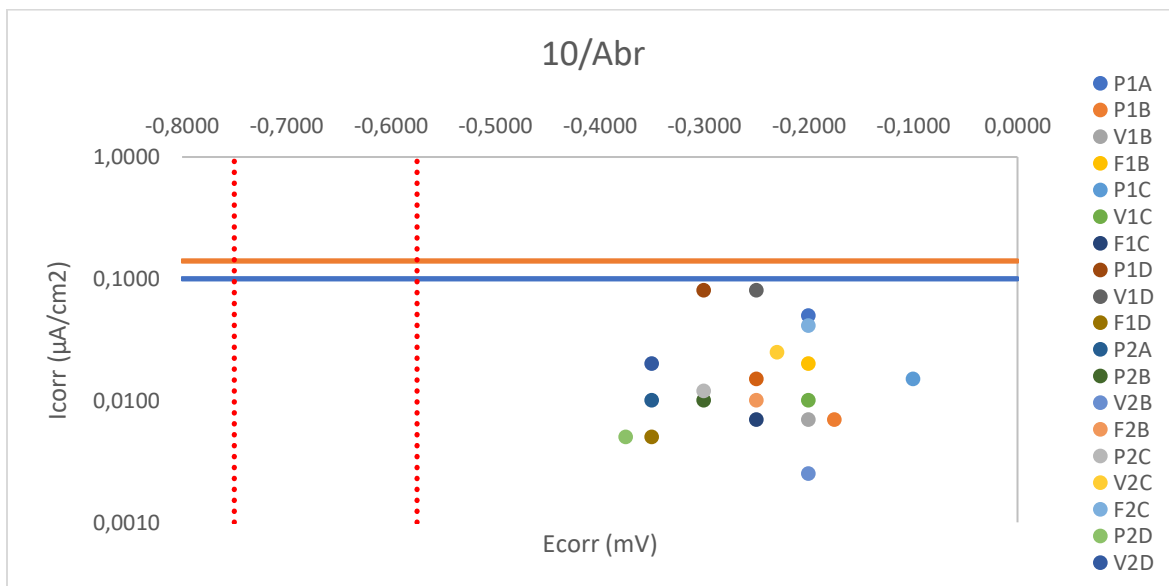


Figura 62. Diagrama de Evans potencial de corrosión vs Velocidad de corrosión, 10 abril

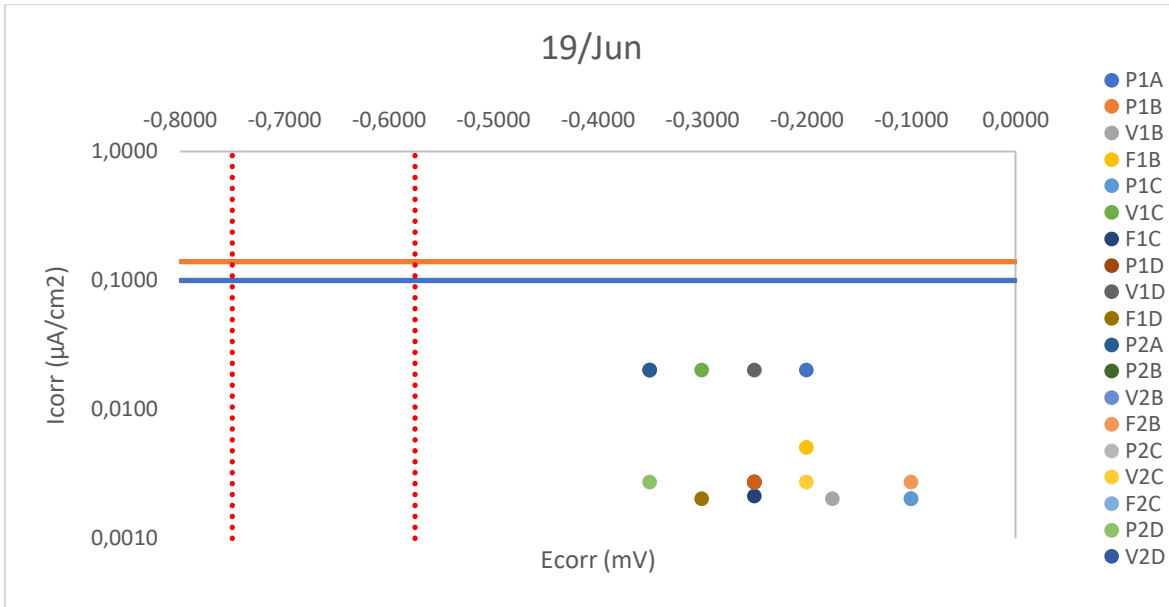


Figura 63. Diagrama de Evans potencial de corrosión vs Velocidad de corrosión, 19 Junio

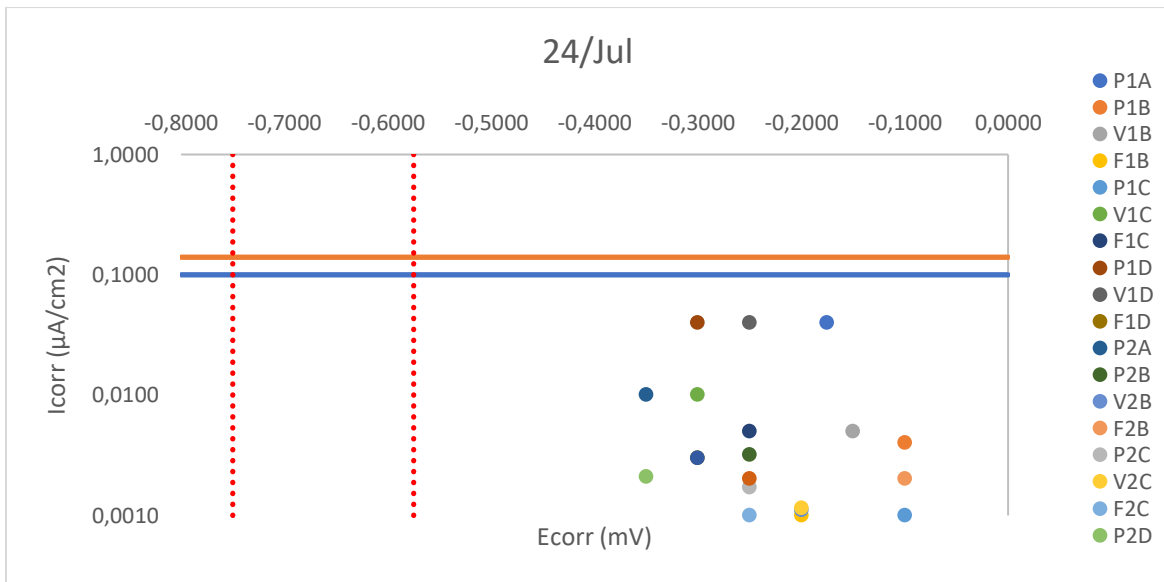


Figura 64. Diagrama de Evans potencial de corrosión vs Velocidad de corrosión, 24 Julio

Los datos relativos al pilar P1D y la viga V1D, situados en el sector D, exhiben una mayor propensión a la corrosión en las mediciones iniciales debido a su proximidad al límite de la velocidad de corrosión (I_{corr}), este aumento inicial podría atribuirse a diversos factores, como la ubicación de estos elementos con respecto al terreno, las adversidades ambientales a las que se encuentran sometidos, entre otros. Sin

embargo, se observa una disminución significativa en los niveles de corrosión hasta el 19 de junio, alcanzando finalmente un punto que puede considerarse libre de riesgo para el 24 de julio. Es crucial destacar que, a pesar de encontrarse en estrecha proximidad al límite, estos elementos no han experimentado despasivación ($\leq 0,100 \mu A/cm^2$), indicando la ausencia de corrosión.

2. Edificio distrito digital de Alicante

2.1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El edificio distrito digital es una obra nueva ejecutada por FCC e impulsada por la Generalitat Valenciana en colaboración con entidades públicas y privadas. Se ubica en el puerto de Alicante, específicamente en la explanada del muelle nº5.

Este proyecto cuenta con $9500 m^2$ aproximadamente en una superficie de $15000 m^2$, los cuales se distribuyen en cuatro (4) estructuras arquitectónicas. Los cubos disponen de dos alturas donde se ubicarán las salas de reuniones y oficinas.

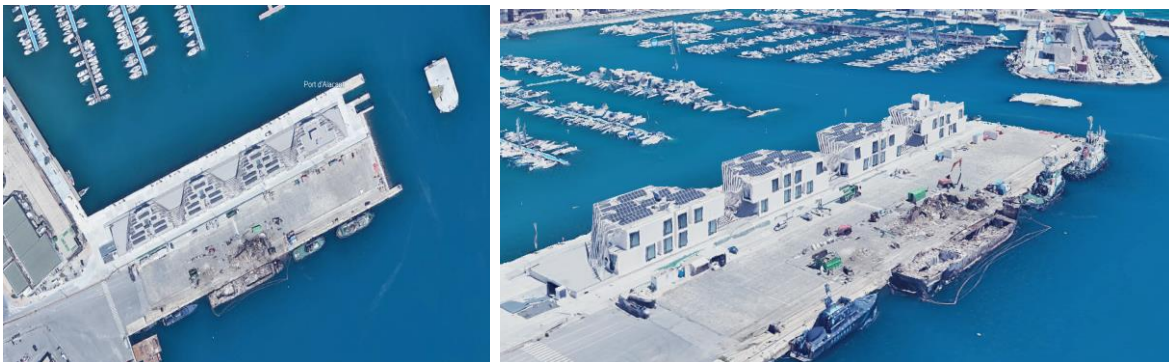


Figura 65. Emplazamiento de la estructura en Google Maps

La obra incluye una cimentación con pilotes de 550 y 650 centímetros de diámetro, contruidos con hormigón HA-35 y reforzados con acero B500S. La losa de cimentación tiene un espesor de 40 centímetros y está hecha de hormigón HA-35, con armadura de acero B500S. Los pilares son rectangulares, con secciones de 30x30 cm y 30x60 cm, contruidos con hormigón HA-30 y reforzados con acero B500S. La obra incluye forjados reticulares y aligerados, contruidos con hormigón

HA-30 y refuerzo de acero B500S. Los forjados son superficies horizontales entre los pisos del edificio y están diseñados para distribuir eficientemente las cargas estructurales. Se emplearon vigas rectangulares de hormigón HA-30, con refuerzo de acero B500S.

En resumen, la obra se caracteriza por el uso de hormigón de alta resistencia HA-35 en la cimentación y HA-30 en los elementos estructurales, con armadura de acero B500S en todos los componentes para garantizar la durabilidad y resistencia de la estructura.

Esta estructura se encuentra expuesta a ciertas clases de exposición debido a su emplazamiento en el muelle del Puerto de Alicante. Según estudios proporcionados por FCC, se refleja el nivel freático a una profundidad de 1.75 m, estando así la obra sometida a sus fluctuaciones.



Figura 66. Sección tipo de la edificación

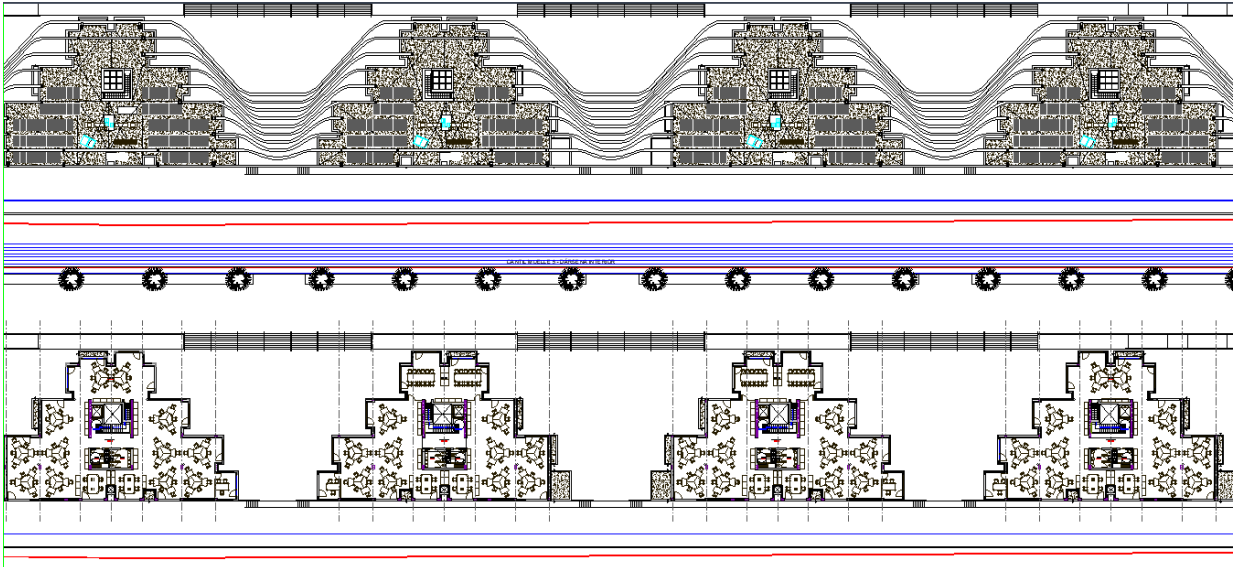


Figura 67. Plantas de uso del edificio, a. Cubierta, b. planta 2ª respectivamente

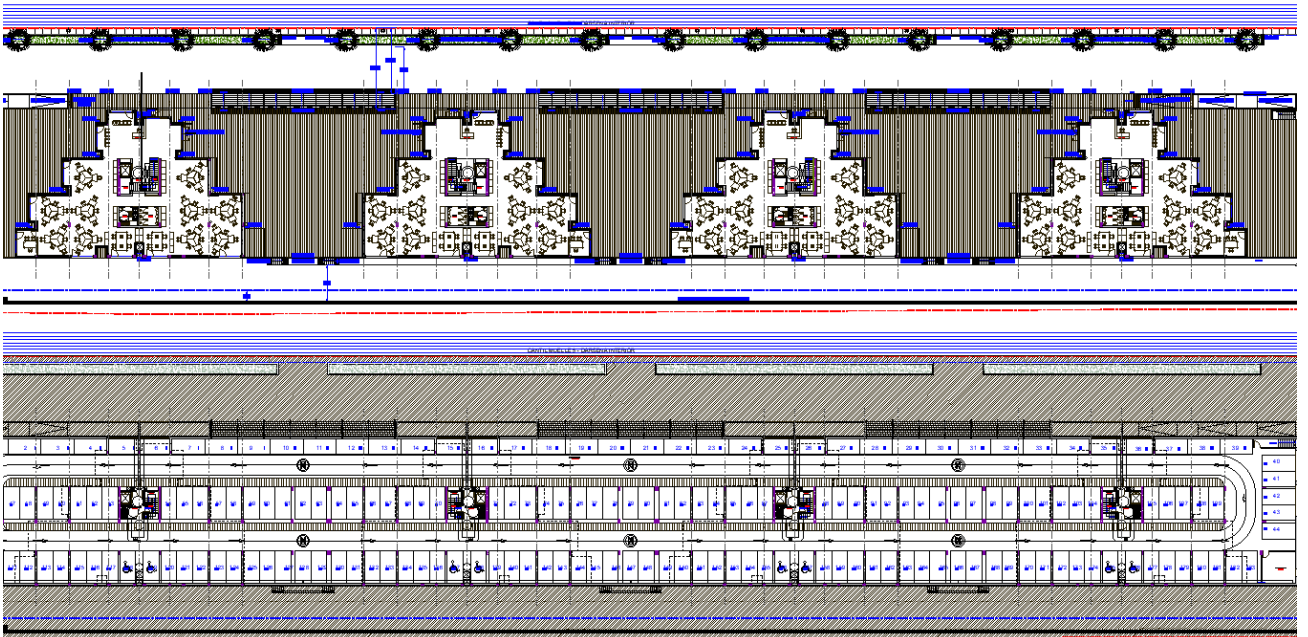


Figura 68. Plantas de uso del edificio, a. planta 1ª b. planta -1ª respectivamente

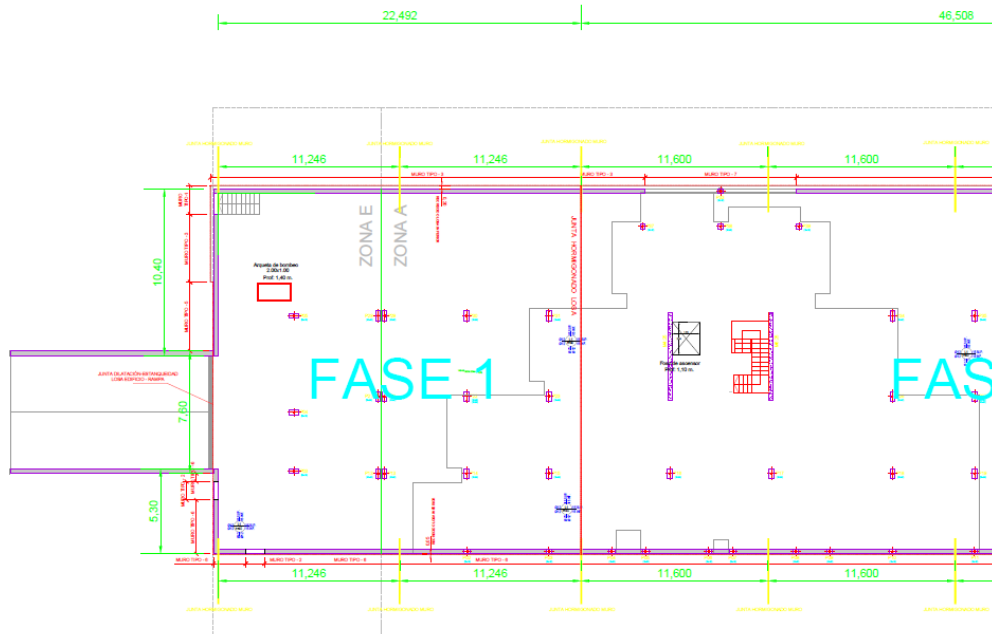


Figura 69. Geometría de la losa de cimentación Fase 1

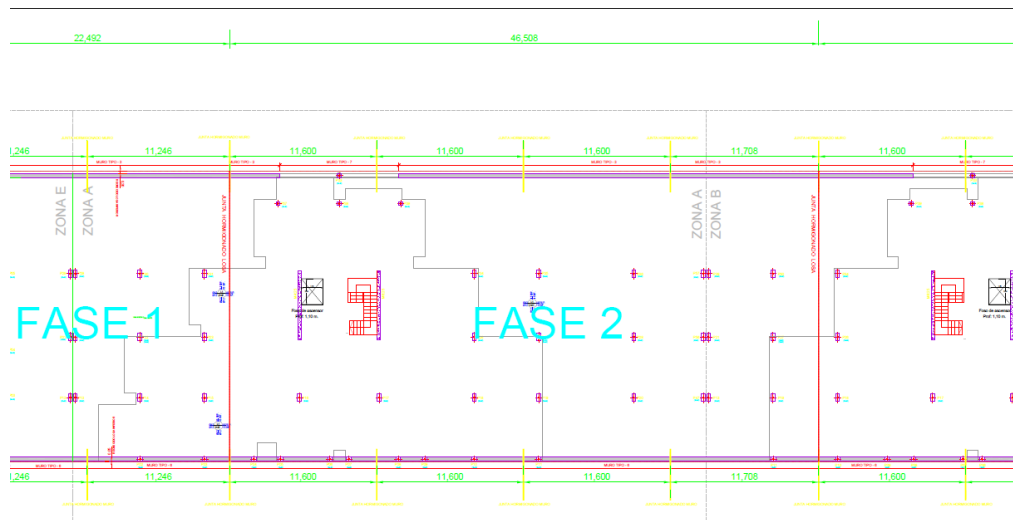


Figura 70. Geometría de la losa de cimentación Fase 2

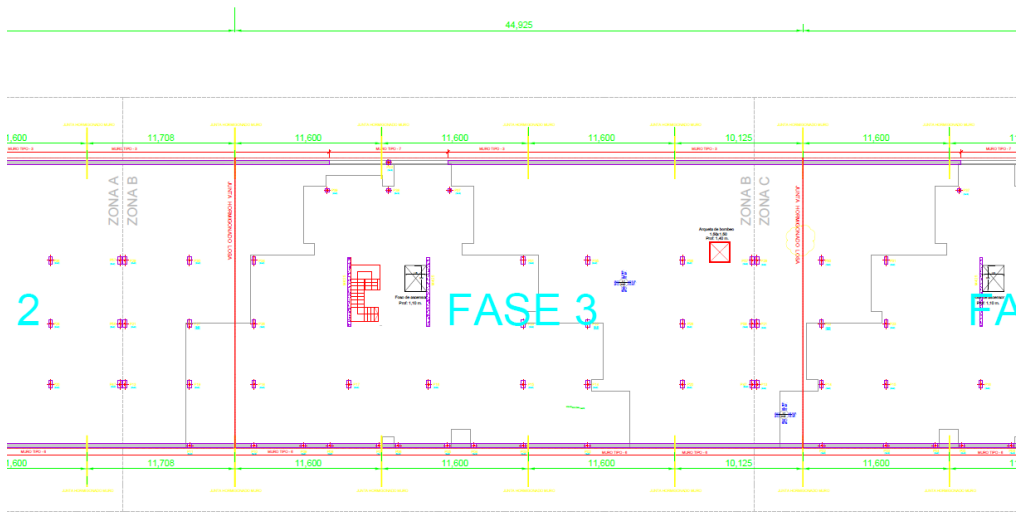


Figura 71. Geometría de la losa de cimentación Fase 3

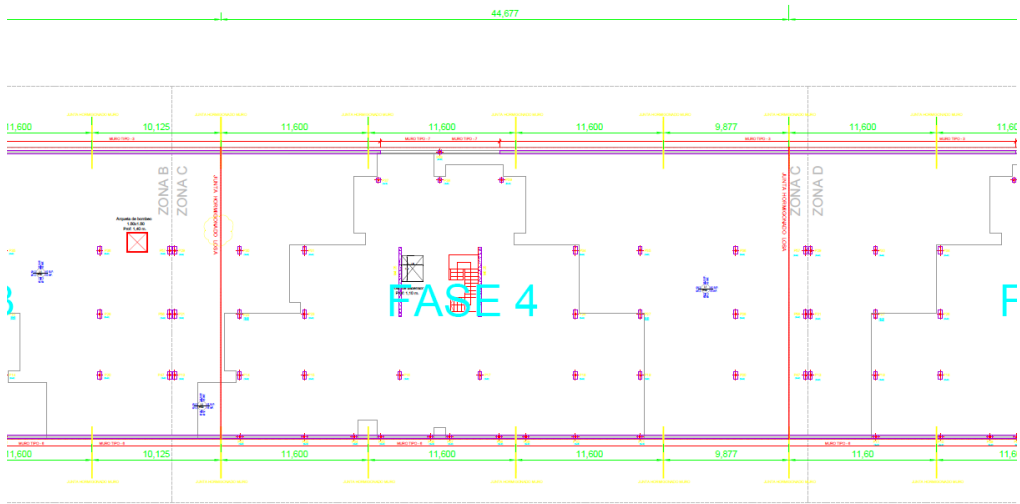


Figura 72. Geometría de la losa de cimentación Fase 4

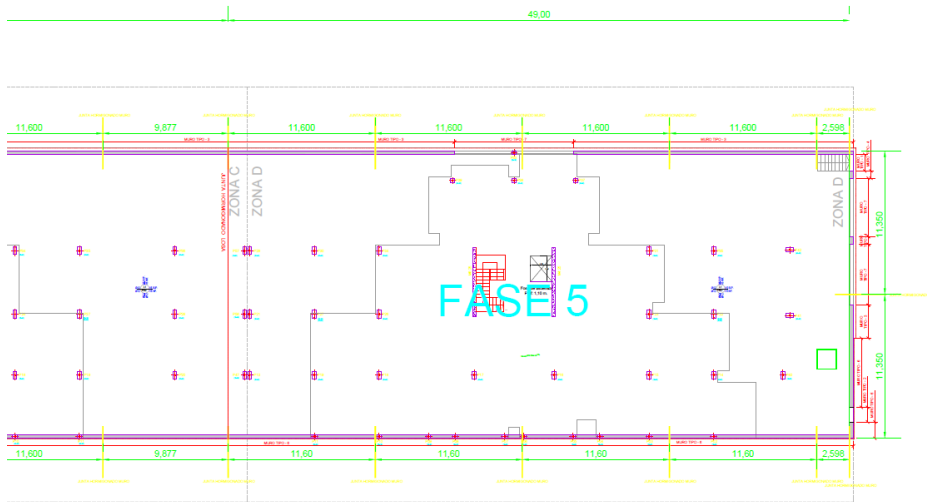


Figura 73. Geometría de la losa de cimentación Fase 5

MURO TIPO - 1	MURO TIPO - 2	MURO TIPO - 3	MURO TIPO - 4
MURO TIPO - 5	MURO TIPO - 6	MURO TIPO - 7	VIGA BORDE DE CANTIL

Figura 74. Detalles de armado de muros tipo del aparcamiento y viga borde de cantil.

Debido al nivel tan superficial del nivel freático y siguiendo la normativa del Código Técnico de la Edificación donde se especifican las exigencias mínimas para la protección frente a la humedad [47] se implementó un aditivo sellador – impermeabilizante para evitar la entrada de agua o humedades producidas por esta.

El aditivo, de nombre KRYSTALINE, es un aditivo impermeabilizante en masa que pasa a formar parte integral del hormigón, incrementando así la impermeabilidad durante toda la vida útil del hormigón. De acuerdo con su ficha técnica, actúa además como un reductor de agua en aproximadamente un 5% reduciendo también hasta un 60% las fisuras por retracción y protegiendo las armaduras contra la corrosión.

2.2. PLAN DE MONITORIZACIÓN

La monitorización del Edificio Distrito Digital de Alicante realizada por CalSens contó con la participación del IETcc – CSIC. La instalación de la monitorización de los parámetros de durabilidad se llevó a cabo por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y la instalación de la monitorización del comportamiento estructural del cual se llevó a cabo por CalSens. Se han seleccionado zonas críticas de la estructura en las cuales se seleccionaron elementos como losas, muros y pilares.

Para llevar a cabo la monitorización total se emplearon sensores que se desarrollaron por las mismas empresas, como es en el caso del Instituto Eduardo Torroja y CalSens. Los sensores que empleó CalSens están basados en la tecnología de Fibra óptica.

2.3. MONITORIZACIÓN PARAMETROS DE DURABILIDAD

El **Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja** junto a **CalSens**, realizaron la selección de las zonas críticas de la estructura y se determinaron las zonas de colocación de la monitorización para el seguimiento de la corrosión de la estructura.



Figura 75. Instalación de sensor de corrosión en muro

El grupo de Investigación del IETcc-CSIC, desarrollaron sensores específicos para su instalación en elementos de hormigón en un edificio en Alicante (principalmente en elementos en contacto con el terreno). Una de las principales características que deben cumplir estos sensores es que, además de su fiabilidad, deben de tener una durabilidad similar a la vida útil de la estructura. Los sensores se desarrollaron en el laboratorio y se instalaron por miembros del propio Grupo de Investigación, con la supervisión y dirección de **CalSens**.

Se realizó la instalación de los siguientes sensores:

- **14 sensores** los cuales son capaces de medir de manera simultánea el potencial de corrosión (E_{corr}) y la velocidad de corrosión (I_{corr}). Ambos parámetros están relacionados directamente con los procesos de corrosión de los armados embebidos en elementos de hormigón. La velocidad de corrosión cuantifica con precisión la pérdida de sección en los armados embebidos en el hormigón debido a procesos de corrosión por presencia de iones cloruros o fenómenos de carbonatación en el hormigón de estudio.
- **6 sensores** de temperatura (T) del elemento para la monitorización de la durabilidad de la estructura de estudio, con el fin de estudiar su posible

influencia en los procesos de corrosión que pudieran llegar a presentarse en la estructura. Se seleccionaron las siguientes zonas para la colocación de estos:

- Dos sensores de la losa: Losa 01 y 04
- Cuatro sensores de los muros, uno correspondiente a cada orientación de la estructura: Muro 02, 04, 06 y 12.

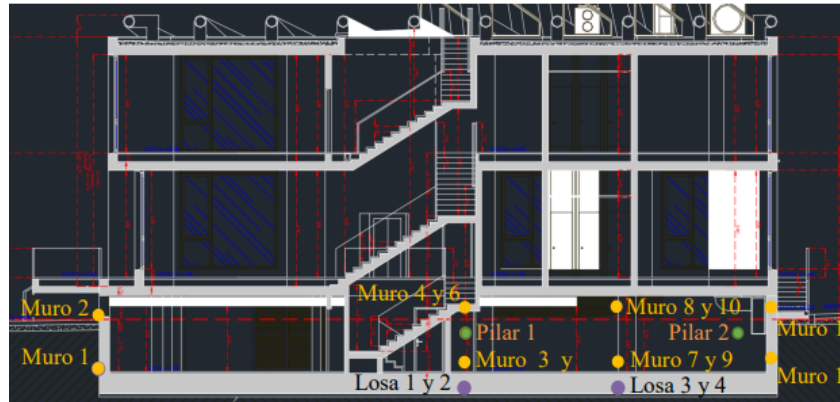


Figura 76. Detalle en alzado de zonas monitorizadas en el aparcamiento.

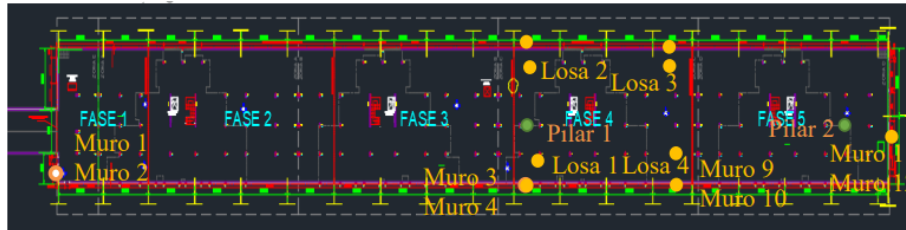


Figura 77. Detalle en planta de las zonas monitorizadas en el aparcamiento.

Los sensores de potencial de corrosión y velocidad de corrosión ocupan un canal del equipo de medida, mientras que los sensores de temperatura ocupan otro canal cada uno de ellos. Siendo, por tanto, 18 canales de registro, 12 canales para la medida de parámetros electroquímicos y 6 canales para la medida de la temperatura.

Se instalaron sensores extra por si hubiera problemas posteriores con los cables o con el propio sensor durante la fase de construcción/ hormigonado del edificio.

A continuación, encontramos un resumen de sensores instalados por el Instituto:

Tabla 5. Referencia de sensores instalados por el IETcc

Sensor	Localización	ZONA	Nombre interno. Sensor N.º
Losa 01	Emparrillado inferior Losa/ 2.5 m del muro	Enterrado	3
Losa 02	Emparrillado inferior Losa/ 2.5 m del muro	Enterrado	5
Losa 03	Emparrillado inferior Losa/ 2.5 m del muro	Enterrado	1
Losa 04 **	Emparrillado inferior Losa/ 2.5 m del muro	Enterrado	4
Muro 01	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	6
Muro 02	Zona superior 2 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Aérea	2
Muro 03	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	7
Muro 04	Zona superior 2 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Aérea	8
Muro 05	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	10
Muro 06	Zona superior 2 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Aérea	11
Muro 07	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	12
Muro 08	Zona superior 2 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Aérea	13
Muro 09	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	14
Muro 10	Zona superior 2 m de Losa/	Aérea	15

	Armadura vertical de trasdós		
Pilar 1	Pilar intermedia a 1.80 m de losa	interior	9
Pilar 2	Pilar intermedia a 1.80 m de losa	interior	16
Muro 11	Zona inferior 1 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Enterrado	17
Muro 12	Zona superior 2 m de Losa/ Armadura vertical de trasdós	Aérea	18

2.4. MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

CalSens fue el encargado de realizar la selección de las zonas críticas de la estructura y se determinó dónde se iban a disponer los sensores de la monitorización para el control del comportamiento estructural de la estructura.

Para la monitorización del comportamiento estructural, se realizó la monitorización del control de deformaciones en forjados donde se planteó el uso de sensores de fibra óptica tipo long-gauge, los cuales fueron empleados en la prueba de carga también.



Figura 78. Sensores long-gauge instalados en la estructura.

Su principal funcionamiento está basado en la tecnología de las FBGs, también permite ser compensado térmicamente y conectados en serie. El cableado de fibra

óptica empleado para la unión de los sensores con los equipos informáticos es de fibra óptica monomodo, con un recubrimiento de acrilato y protección de 3mm con fibra de aramida en su interior.

El sistema óptico de adquisición de datos consiste en un interrogador estático de sensores ópticos basados en FBGs. El software informático de adquisición de resultado es capaz de representar en tiempo real el valor de las magnitudes instrumentos y el envío automatizado de alarmas vía SMS o mail por superación de umbrales previamente establecidos.

Se contempla la instalación de 3 sensores de deformación de Longitud (long-gauges) y 2 sensores de temperatura ambiente. Distribuidos de la siguiente manera:

- **3 sensores** de deformación de longitud (long-gauge), ubicados en la cara inferior del forjado 1°.
- **3 sensores** de temperatura junto a los sensores de deformación.

A continuación, se muestra el plano de localización final de los sensores instalados por **CalSens**:

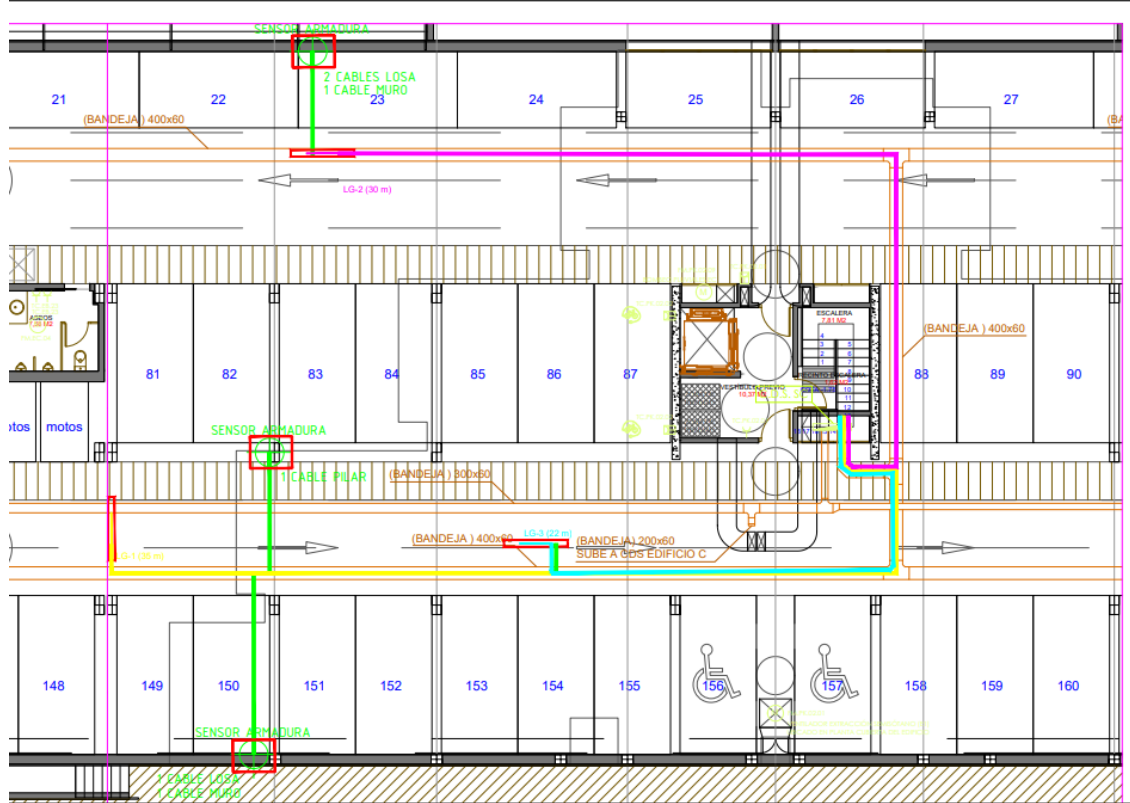


Figura 79. Localización de sensores long-gauge y de temperatura para monitorizar el comportamiento estructural

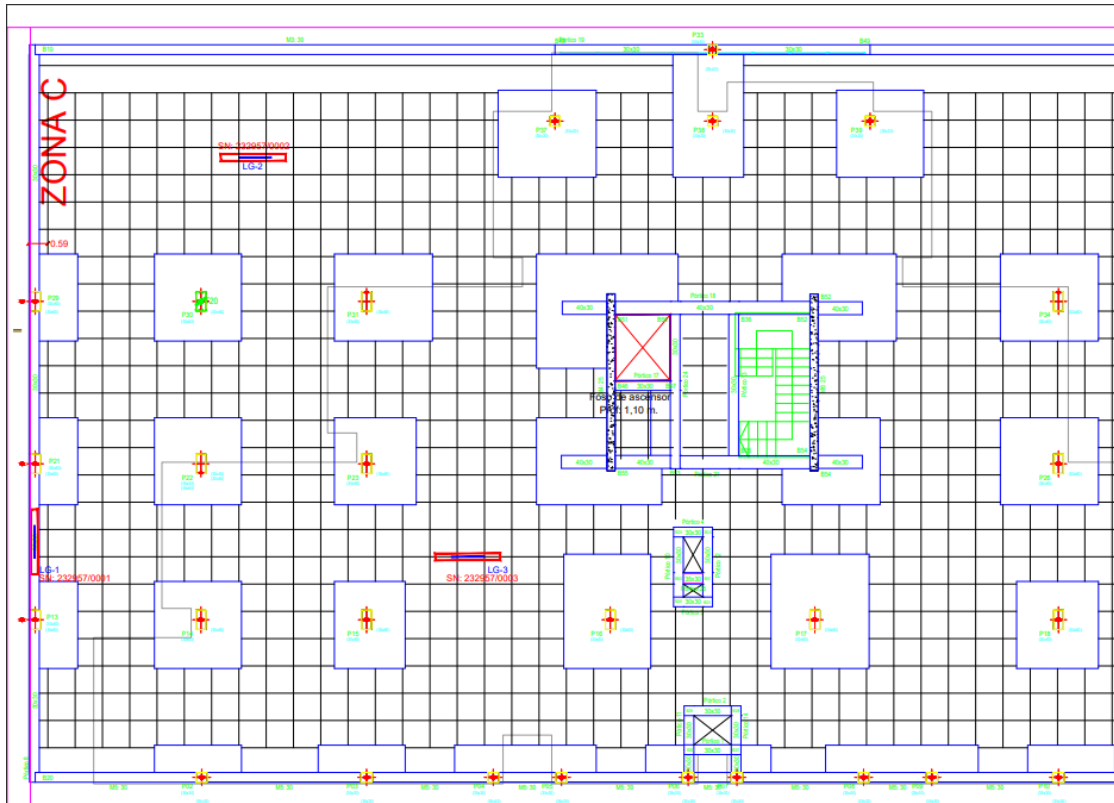


Figura 80. Localización sensores para monitorizar el comportamiento estructural ZONA C



	Sensor long – gauge
	Sensor de temperatura integrado

Figura 81. Leyenda de sensores

2.5. RESULTADOS

Desde la puesta en marcha del sistema de monitorización se han podido adquirir datos que nos dejan conocer el estado de la armadura de las losas, muros y pilas donde se ubicaron sensores de corrosión y temperatura.

Referente al potencial de corrosión se obtuvieron los siguientes resultados:

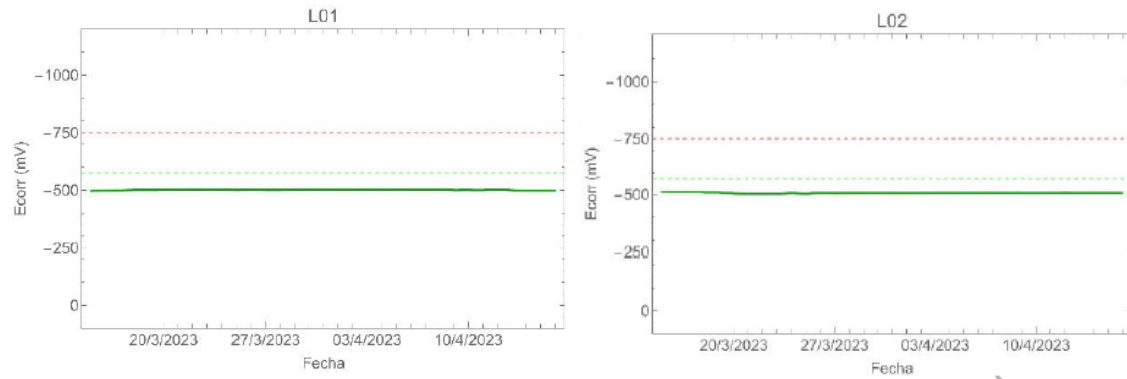


Figura 82. Potencial de corrosión en L01 y L02

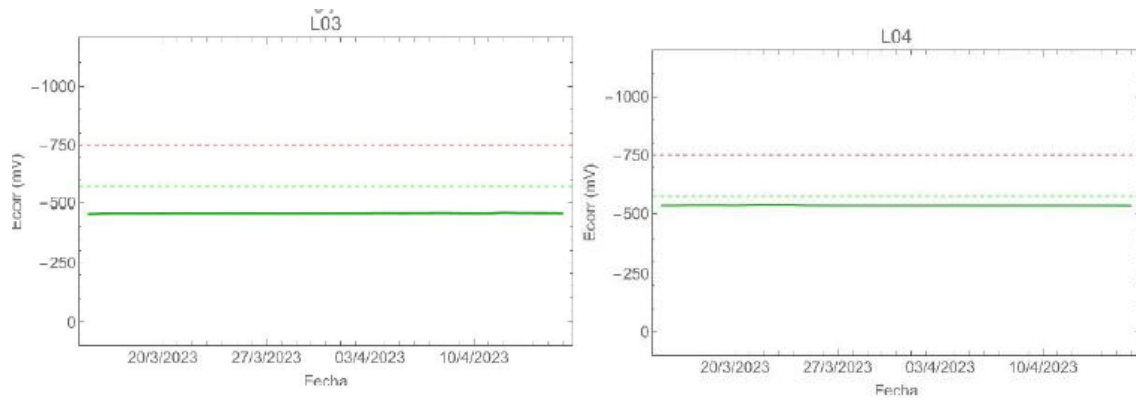


Figura 83. Potencial de corrosión en L03 y L04

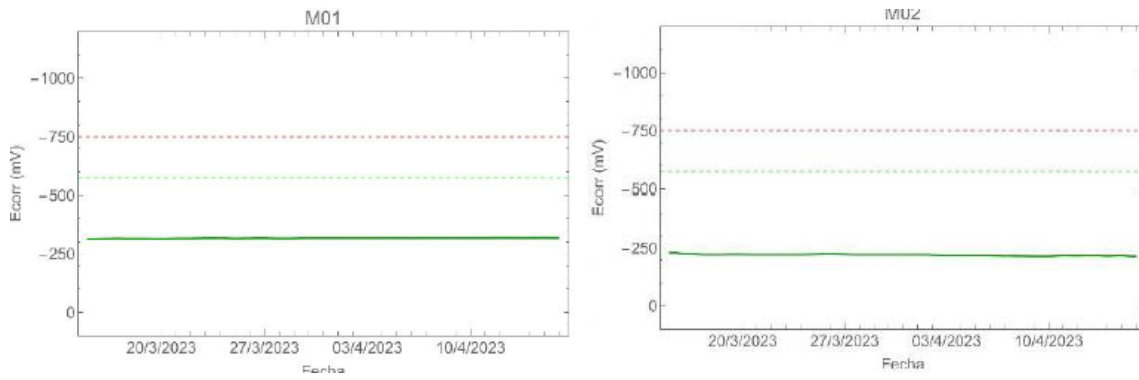


Figura 84. Potencial de corrosión en M01 y M02

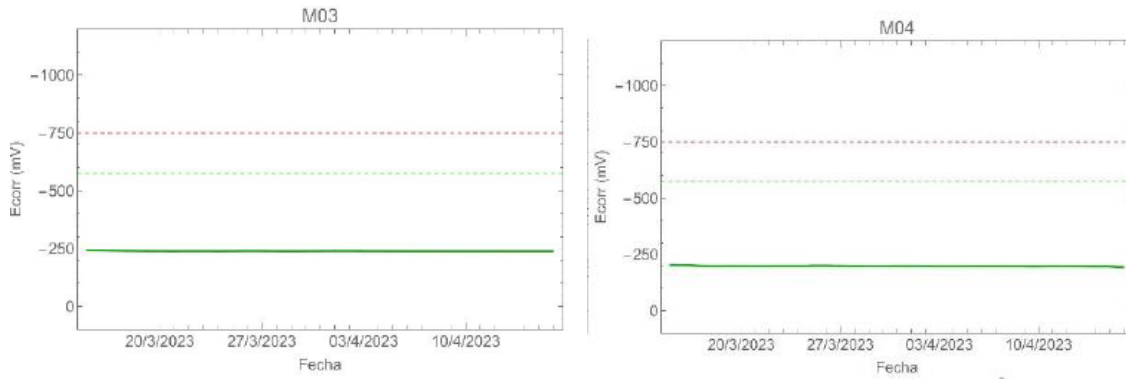


Figura 85. Potencial de corrosión en M03 y M04

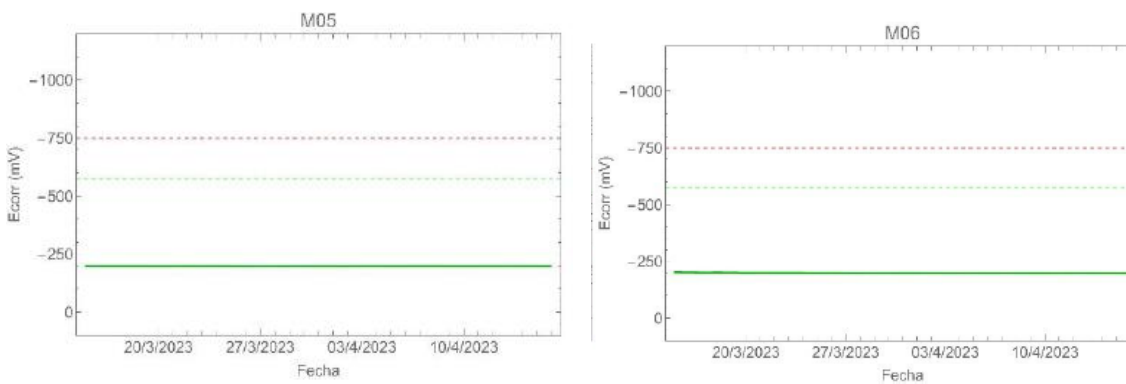


Figura 86. Potencial de corrosión en M05 y M06

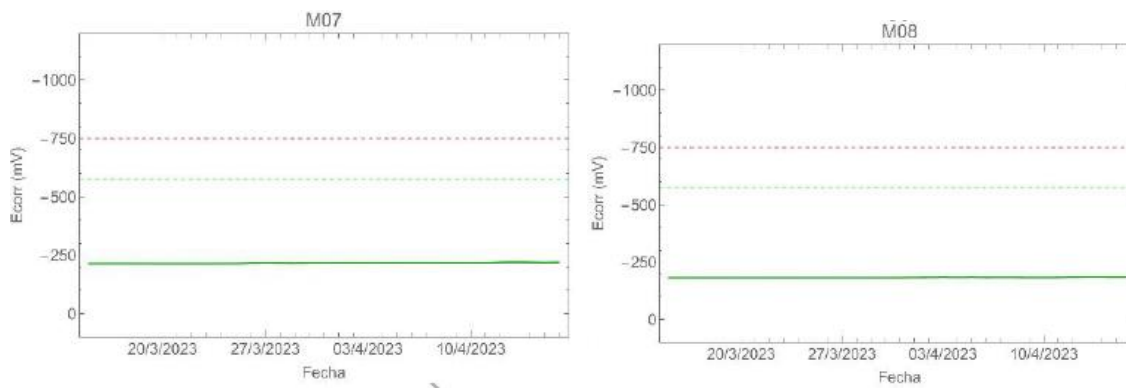


Figura 87. Potencial de corrosión en M07 y M08

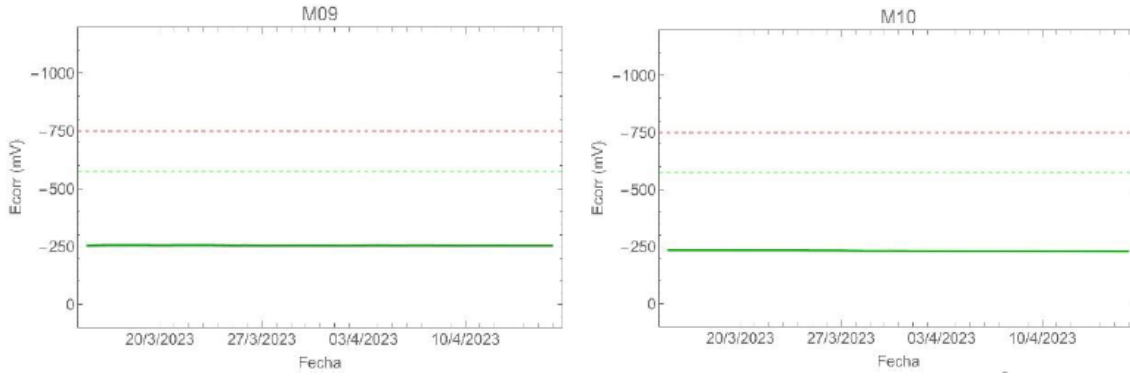


Figura 88. Potencial de corrosión en M09 y M10

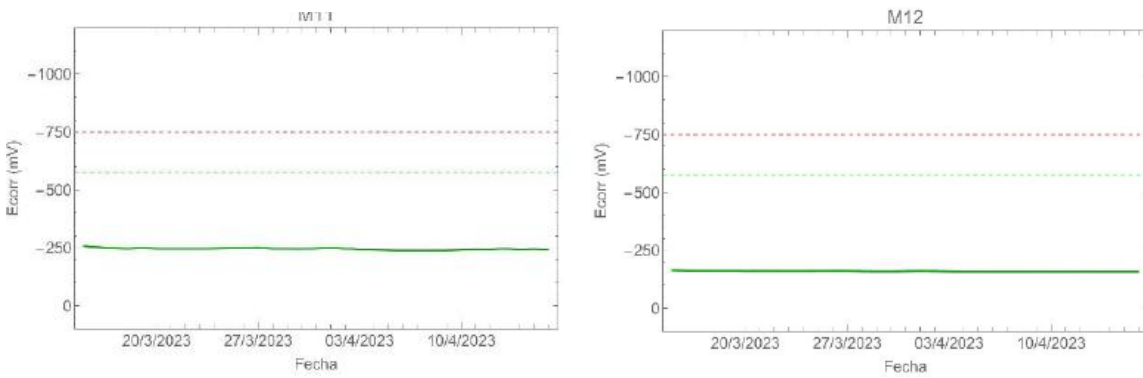


Figura 89. Potencial de corrosión en M11 y M12

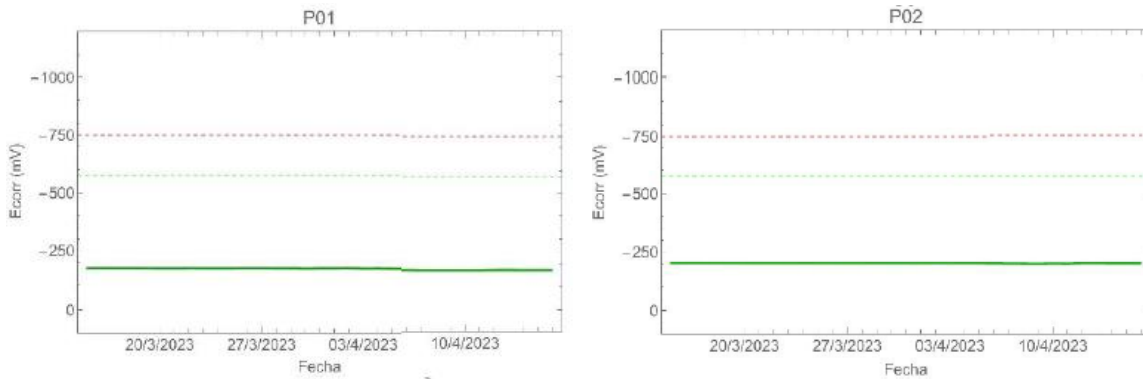


Figura 90. Potencial de corrosión en P01 y P02

Tras examinar detenidamente los resultados obtenidos, observamos que las losas monitorizadas se encuentran muy cerca del límite establecido, mostrando un grado de exposición significativo a la corrosión debido a su contacto continuo con el nivel del agua del mar. Sin embargo, es importante destacar que ningún elemento

monitoreado alcanza un nivel de riesgo de corrosión moderado; todos ellos se mantienen en un estado pasivo de riesgo bajo de corrosión.

A continuación, los datos obtenidos por la monitorización llevada a cabo respecto a la velocidad de corrosión:

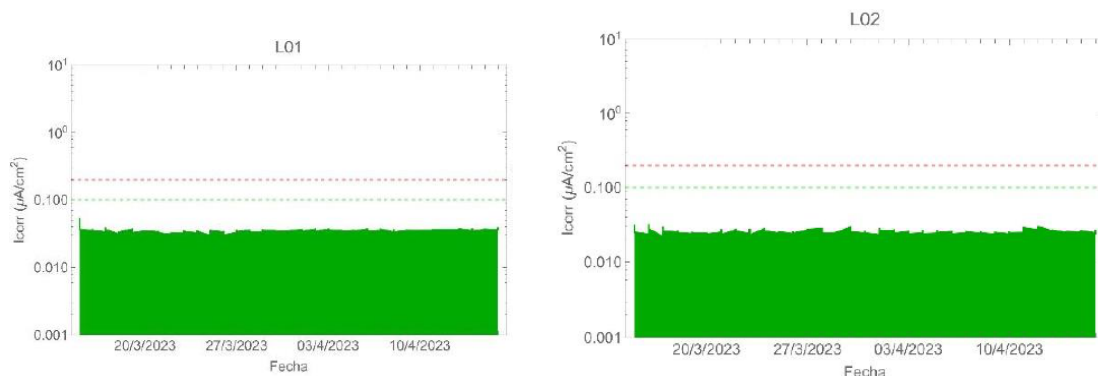


Figura 91. Velocidad de corrosión en L01 y L02

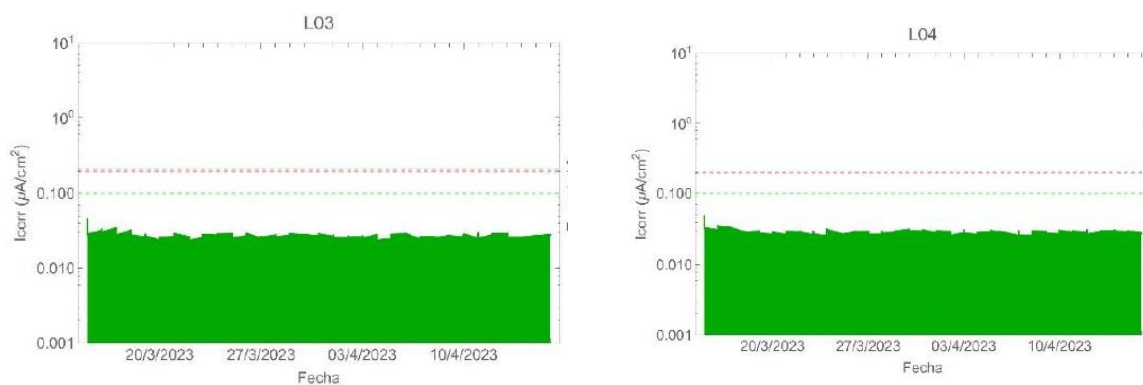


Figura 92. Velocidad de corrosión en L03 y L04

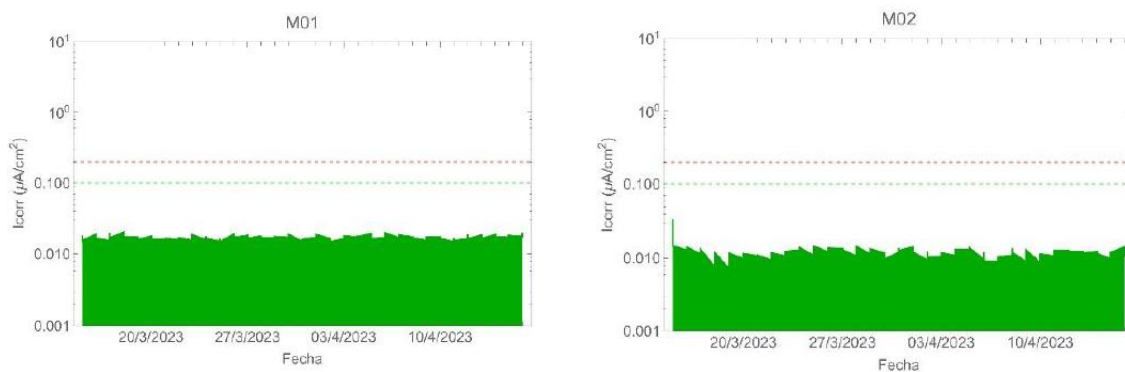


Figura 93. Velocidad de corrosión en M01 y M02

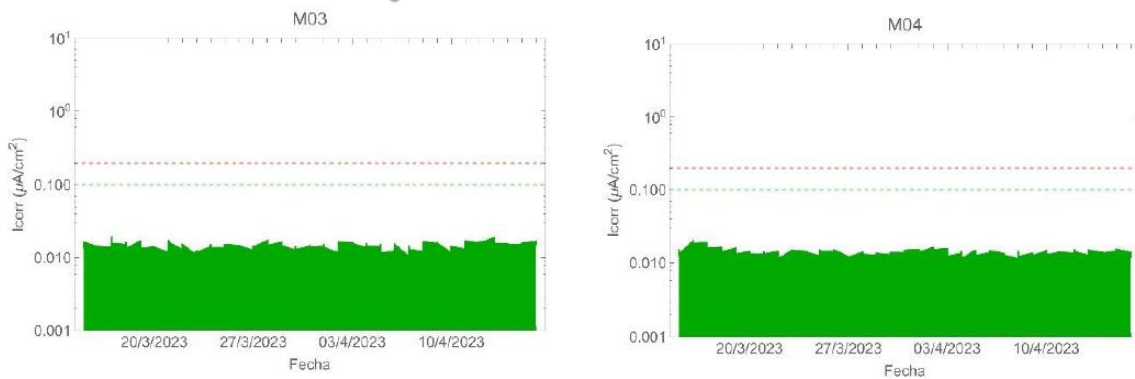


Figura 94. Velocidad de corrosión en M03 Y M04

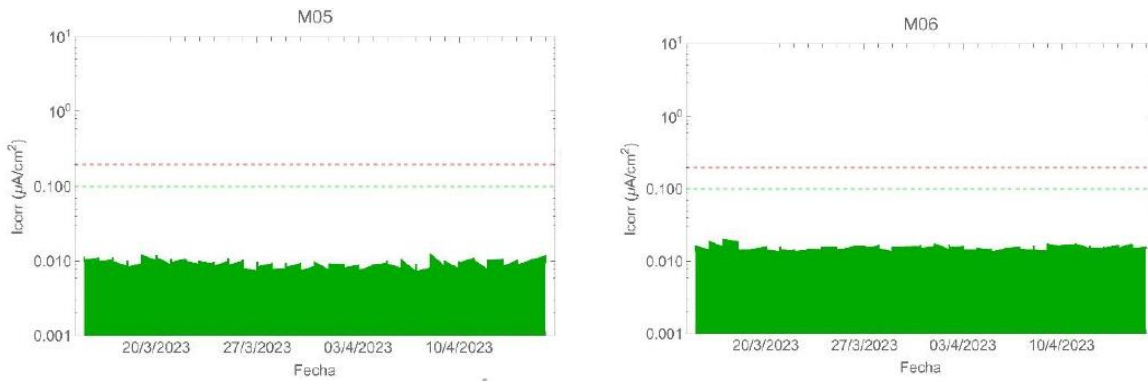


Figura 95. Velocidad de corrosión en M05 y M06

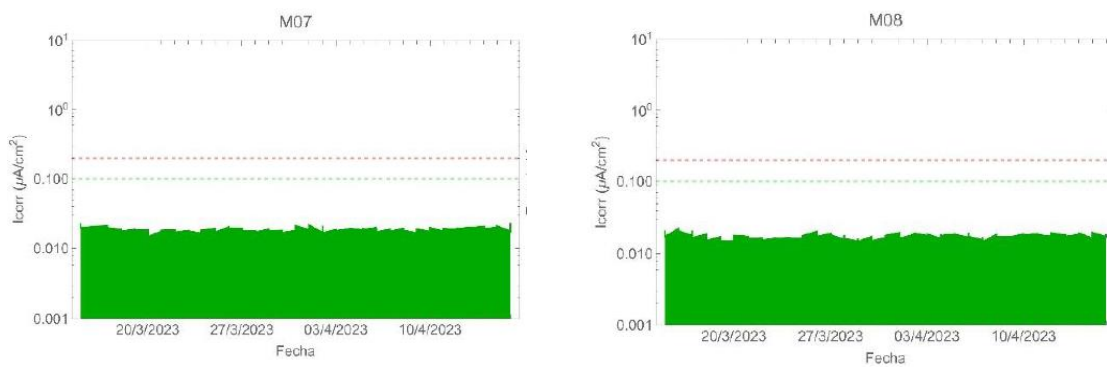


Figura 96. Velocidad de corrosión en M07 y M08

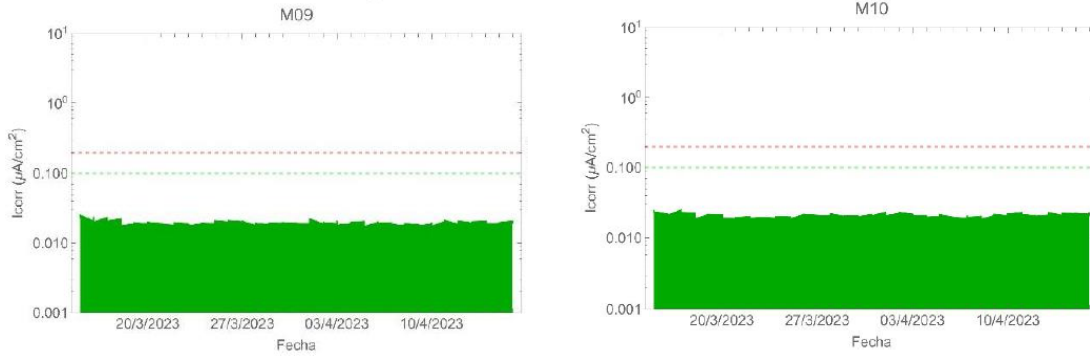


Figura 97. Velocidad de corrosión en M09 y M10

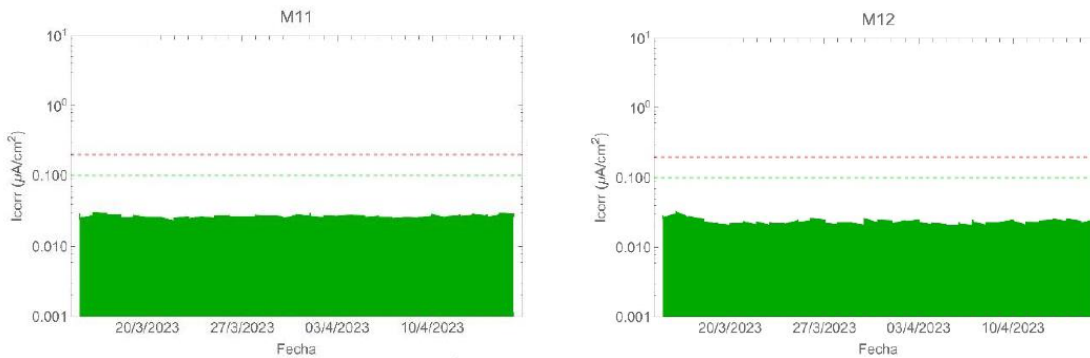


Figura 98. Velocidad de corrosión en M11 y M12

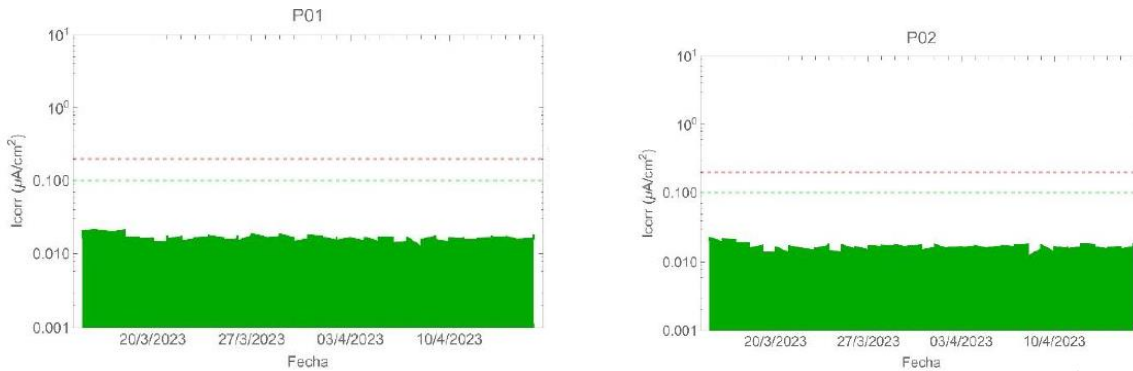


Figura 99. Velocidad de corrosión en P01 y P02

De acuerdo con los datos obtenidos de la monitorización, los valores referentes a la velocidad de corrosión de los elementos monitorizados no superan los $0,1 \mu A/cm^2$, esto quiere decir que todos los elementos monitorizados (Pilas, muros y losas) se encuentran en estado pasivo, sin signos de corrosión. Sin embargo, notamos que los valores obtenidos de las losas monitorizadas se encuentran cercanos a su límite,

pero no lo sobrepasan. Además, se evidencian pequeñas variaciones en elementos que se deben a la influencia de la radiación o insolación y la temperatura exterior.

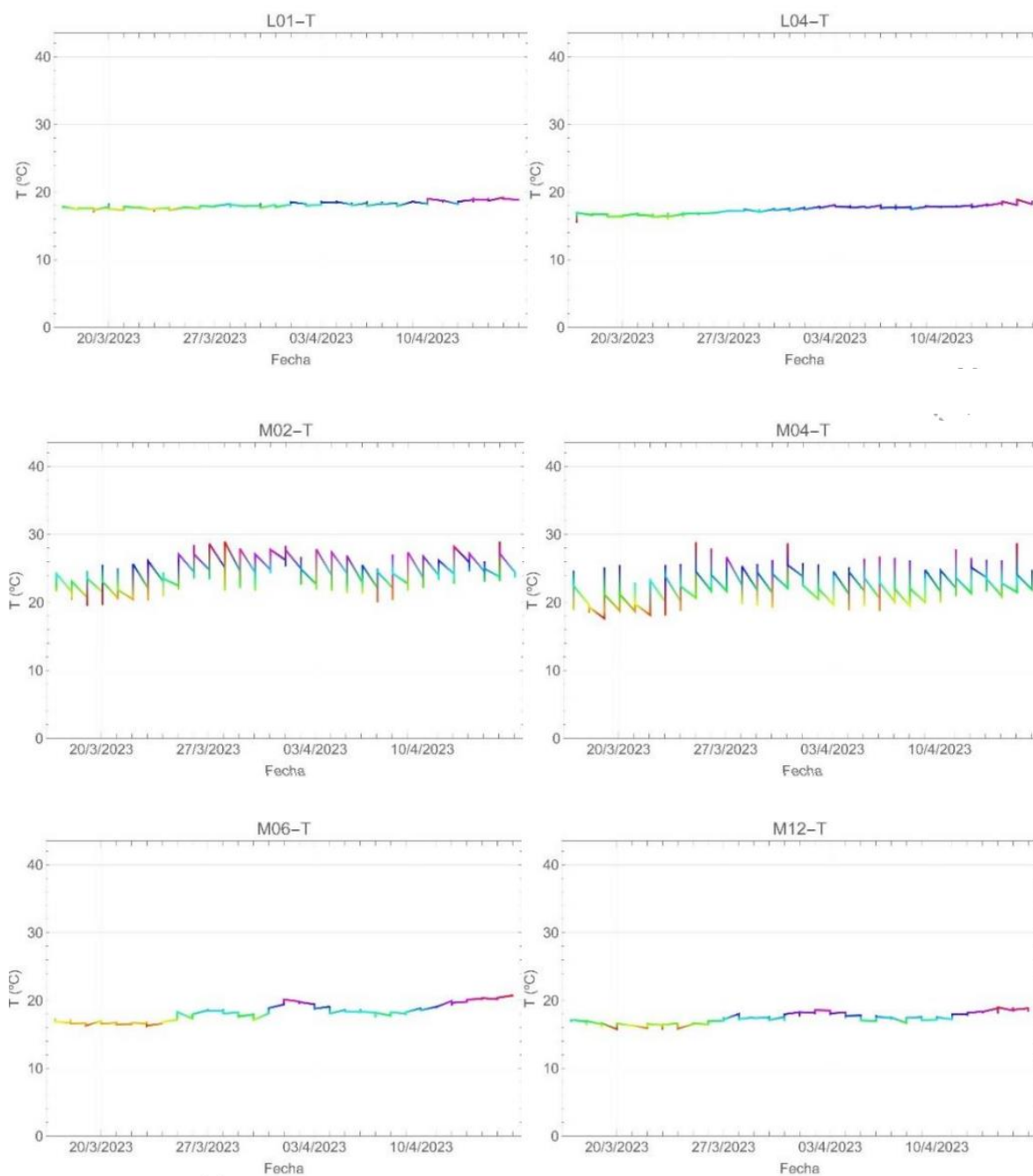


Figura 100. Temperatura tomada en elementos de la estructura

La temperatura obtenida durante la monitorización ha sido bastante constante, pudiendo así evidenciar la evolución de la velocidad de corrosión y potencial de corrosión respecto a esta.

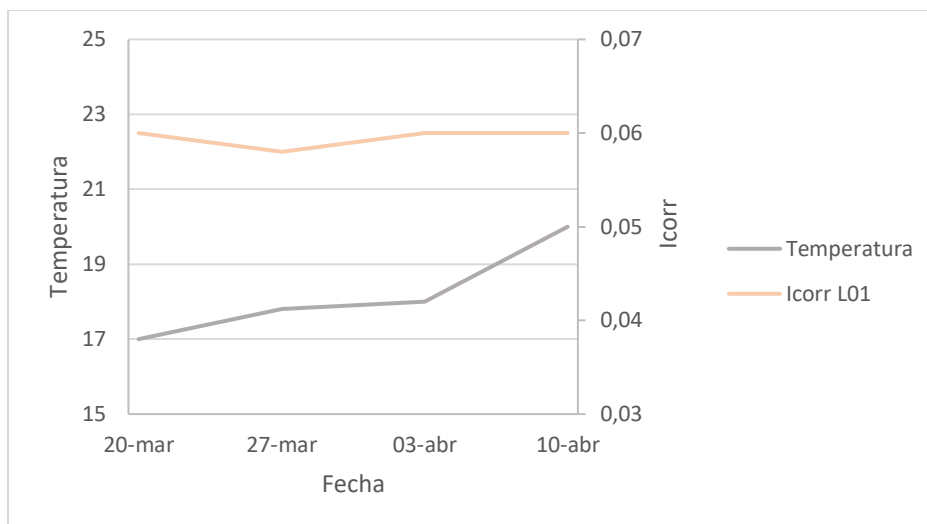


Figura 101. Evolución de temperatura vs Icorr en L01

En la siguiente figura, se presenta un diagrama de Evans. En el eje Y, se representan los valores de Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y en el eje X, se muestran los valores de Ecorr (mV). Es importante destacar que ninguno de los elementos monitorizados supera los valores umbrales definidos en el apartado 4.3. Límites establecidos.

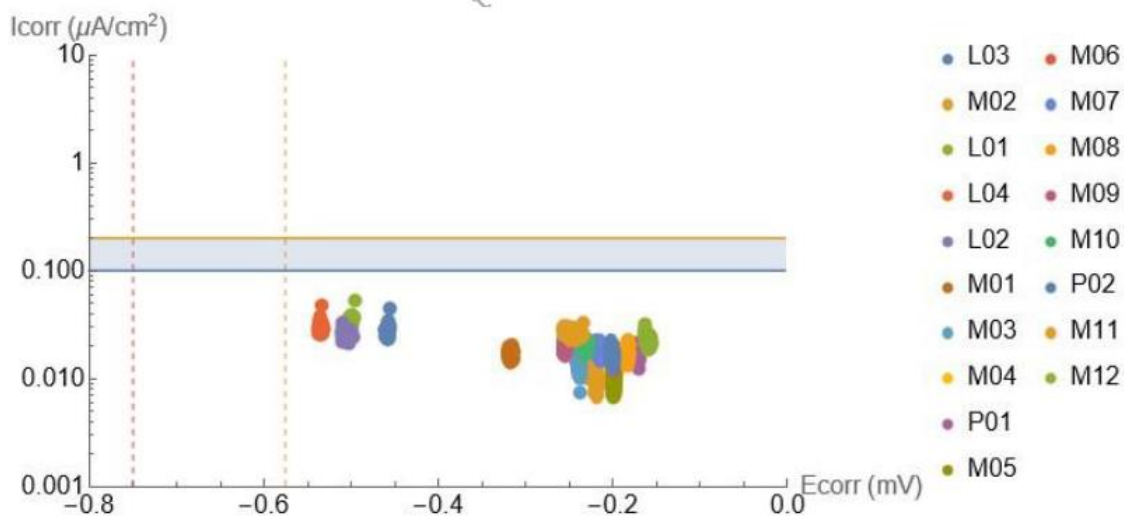


Figura 102. Diagrama Evans representando valores de velocidad y potencial de corrosión de los elementos monitorizados

A continuación, se muestran los valores correspondientes a las losas (L01, L02, L03, L04), las cuales presentan una mayor probabilidad de corrosión debido a su

proximidad al límite que indica la velocidad de corrosión para la despasivación ($\leq 0,100 \mu A/cm^2$). Sin embargo, es importante señalar que estos valores tampoco alcanzan a superar sus umbrales, lo que significa que estas losas continúan exentas de corrosión hasta el momento.

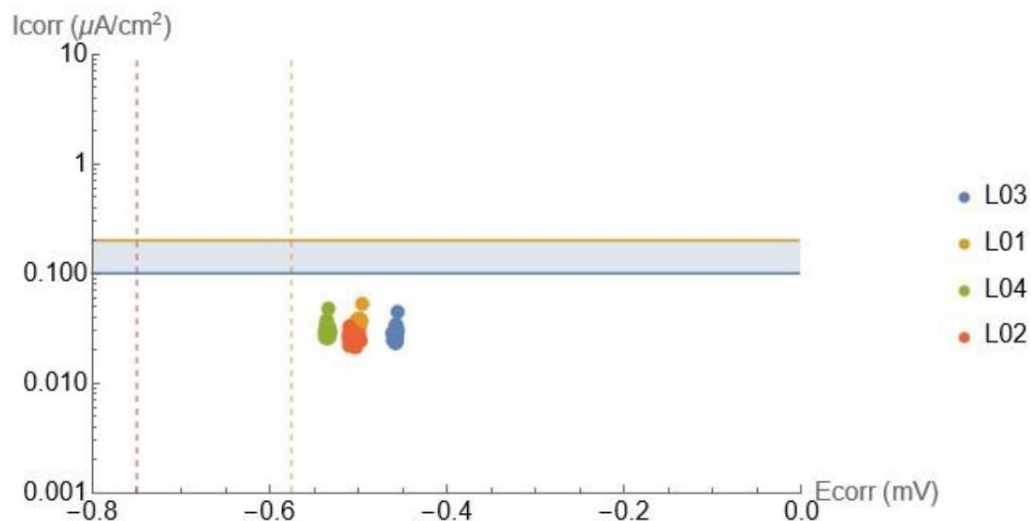


Figura 103. Diagrama Evans representando valores de velocidad y potencial de corrosión en las losas

Es fundamental subrayar que, según la norma ASTM C876-15, la pasividad de un acero se determina por la condición en la cual la velocidad de corrosión se mantiene por debajo de $0.1 \mu A/cm^2$. Esta especificación sirve como un criterio esencial para evaluar la integridad de la protección contra la corrosión en estructuras de acero en entornos diversos.

Una observación significativa en este contexto es que una velocidad de corrosión que disminuye con el tiempo, junto con un potencial de corrosión que aumenta, es un indicador sólido de que la protección anticorrosiva sigue siendo efectiva. Esta combinación de factores sugiere que el acero se encuentra en un estado pasivo, lo que significa que está resistiendo la corrosión de manera eficaz y que las medidas de prevención implementadas, al menos en estas primeras etapas, están cumpliendo su función.

Capítulo 4. Conclusiones

En el transcurso de este trabajo de Fin de Master, se han alcanzado conclusiones con relación a la monitorización de la corrosión de armaduras en estructuras de hormigón, abordando de manera efectiva los objetivos específicos establecidos. La revisión bibliográfica y el estado del arte permitieron consolidar un conocimiento sólido de las técnicas y avances en este campo, proporcionando la base necesaria para llevar a cabo investigaciones y análisis posteriores. A través del diseño y seguimiento de la monitorización en dos estructuras, una de obra nueva y otra rehabilitada después de haber sufrido un fuerte deterioro por corrosión, se obtuvieron datos en tiempo real de ubicaciones estratégicas, lo que resultó esencial para evaluar la integridad estructural.

La monitorización de la corrosión en estructuras de hormigón es un aspecto crítico en la preservación de la durabilidad y seguridad a largo plazo de las infraestructuras civiles. Los sensores electroquímicos se han destacado como herramientas valiosas para evaluar el estado de corrosión y brindar información temprana sobre los procesos de degradación en curso.

En el contexto del estacionamiento de la Plaza de la Reina, una estructura rehabilitada con una antigüedad superior a los 50 años se ha concluido que los elementos bajo observación mantienen un estado pasivo, exento de riesgo de corrosión. A pesar de esta afirmación, se ha observado que ciertos elementos exhiben valores que superan la media registrada en otras áreas, aunque siempre se mantienen por debajo de los límites establecidos por las normativas pertinentes para la velocidad de corrosión (I_{corr}). Estos elementos específicos se localizan en la zona 1D en el nivel -1 (P-1D y V-1D), los cuales inicialmente presentan datos elevados, cercanos a los límites, pero que disminuyen progresivamente hasta alcanzar valores de $0.04 \mu A/cm^2$. Estas variaciones pueden atribuirse a la ubicación geográfica de estos elementos, así como a las condiciones de humedad y temperatura a las que están expuestos.

En lo que respecta a los resultados obtenidos para la velocidad de corrosión (I_{corr}) en el aparcamiento, se ha confirmado que ninguno de los elementos sometidos a

monitoreo supera el límite crítico de velocidad de corrosión de $0.1 \mu A/cm^2$, tal como lo establece la normativa vigente.

En cuanto al edificio Distrito Digital de Alicante, una construcción nueva con menos de un año de antigüedad, se han obtenido resultados relacionados con los elementos monitorizados, incluyendo losas, muros y pilares. El diagrama de Evans (Figura 103) nos muestra un comportamiento unánime de los elementos en esta estructura tanto para la velocidad de corrosión como para el potencial. Cabe mencionar que más del 50% de los elementos monitorizados se encuentran en un rango aceptable.

En lo que respecta al potencial de corrosión (E_{corr}), cuyos umbrales se basan en las pautas de la ASTM C876:15, se han registrado valores inferiores a -575 mV para losas, muros y pilares. No obstante, se ha observado que los datos concernientes a las losas son relativamente elevados, aunque siguen estando por debajo de los límites, lo cual se puede atribuir a su cercana exposición continua al agua de mar.

Al considerar la velocidad de corrosión (I_{corr}), se aprecia nuevamente que las losas son los elementos que se acercan más al límite establecido. A pesar de esto, es importante señalar que en el periodo monitorizado apenas han presentado variaciones en E_{corr} e I_{corr} en el tiempo; además todos los elementos incluidos aquellos con valores más altos se mantienen en un estado pasivo, lo que significa que, a día de hoy, no están en riesgo de sufrir corrosión.

Al comparar los resultados obtenidos con las normativas y recomendaciones existentes, se pudo confirmar la utilidad de esta técnica como herramienta efectiva para determinar la salud de las estructuras de hormigón. Los valores de velocidad y potencial de corrosión se mantuvieron dentro de los límites aceptables, lo que indica que las medidas de prevención y protección implementadas en estos casos han sido efectivas hasta el momento. Además, el análisis detallado de la relación entre la velocidad y el potencial de corrosión proporcionó una comprensión más profunda de los mecanismos subyacentes de la corrosión, lo que puede contribuir a una gestión más precisa de las estrategias de mantenimiento y reparación.

En última instancia, este estudio ofrece conclusiones valiosas que respaldan la importancia de la monitorización de la corrosión como parte integral de la gestión de infraestructuras. La información recopilada a lo largo de este trabajo subraya la relevancia de realizar seguimientos regulares y sistemáticos de los parámetros clave de corrosión, especialmente la velocidad y el potencial de corrosión, para garantizar la durabilidad y la vida útil de las estructuras de hormigón. Además, las recomendaciones formuladas en función de los resultados obtenidos tienen el potencial de orientar la implementación de estrategias de mantenimiento y protección a largo plazo.

En resumen, esta investigación no solo contribuye al conocimiento actual en el campo de la ingeniería civil y la gestión de infraestructuras, sino que también tiene implicaciones prácticas importantes para la preservación de nuestras estructuras de hormigón en el futuro. La monitorización continua de la corrosión y la comprensión de los indicadores clave de deterioro son esenciales para garantizar la seguridad y la sostenibilidad de nuestras infraestructuras civiles en un mundo en constante evolución.

Capítulo 5. Futuros desarrollos

La monitorización de estructuras, con un enfoque particular en la detección y evaluación de la corrosión en hormigón armado, es una disciplina en constante evolución. Si bien ha demostrado ser una herramienta valiosa para la preservación de infraestructuras, presenta desafíos y limitaciones que deberán abordarse en futuros desarrollos.

- Precisión y Sensibilidad en la Detección de Corrosión: La detección precisa de la corrosión en sus etapas iniciales es esencial para la gestión efectiva de la estructura. Futuros desarrollos deben enfocarse en mejorar la precisión y sensibilidad de los sensores y técnicas de monitoreo para identificar la corrosión incipiente.
- Monitoreo a Largo Plazo: Las estructuras de hormigón armado a menudo tienen una vida útil de décadas o más. Desarrollar tecnologías que permitan un monitoreo efectivo y continuo a largo plazo es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de estas infraestructuras.
- Integración de Sensores en el Diseño Estructural: Integrar sensores de monitoreo en el diseño estructural desde el principio es fundamental, pero puede ser complicado. Los futuros desarrollos deberán facilitar la incorporación de sensores en el diseño y la construcción de manera más efectiva.

En este contexto, sería sumamente relevante abordar la medición de características fundamentales del hormigón, como el pH y la concentración de cloruros, mediante la implementación de sensores. La evaluación de la evolución de estas propiedades en relación con el desarrollo de la corrosión en las armaduras brindaría una visión más completa de la integridad estructural. Es digno de mención que en el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción se está llevando a cabo la medición de la conductividad del hormigón en el recubrimiento mediante nuevos sensores, representando una iniciativa innovadora en este campo

Adicionalmente, resulta imperativo destacar la importancia de integrar estos avances tecnológicos en los sistemas de monitoreo desde las fases iniciales del diseño estructural. Aunque fundamental, la integración de sensores de monitoreo

en el diseño estructural plantea desafíos que deben ser abordados en futuros desarrollos. Facilitar la incorporación efectiva de sensores en el diseño y la construcción no solo optimizará la eficacia del monitoreo, sino que también contribuirá significativamente a la gestión integral de la integridad estructural a lo largo del extenso ciclo de vida de las infraestructuras de hormigón armado.

Capítulo 6. Bibliografía

-
- [1] Comité Europeo de Normalización (CEN). (2011). UNE-EN 1992-1-1:2011. Euro código 2: Proyecto de estructuras de hormigón. parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [2] Christian Escrig, & Lluís Gil. (2016). Refuerzo a Cortante de Vigas de Hormigón Armado con Tejidos y Matrices Base Cemento. Análisis y Comparativa.
- [3] Gandía Romero, J. M. (2014). Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado.
- [4] Ramón Zamora, J. E. (2013). Caracterización de sensores para la alerta temprana de procesos de corrosión en hormigón armado. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/33825>
- [5] Lliso Ferrando, J. R. (2022). Monitorización de la durabilidad de estructuras existentes de hormigón armado mediante la inserción de una red de sensores. [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/184378>
- [6] Gómez, E. D., Carricondo, J. I., Torres Ramirez, J. E., Vazquez, D. R., Farina, S. B., & Duffó, G. S. (2022). Sensores para el monitoreo de corrosión en hormigón armado: desarrollo y aplicabilidad. *Revista Hormigón*, 61, 24–33.
- [7] Rodríguez, H. (n.d.). Propiedades del hierro (Fe). Retrieved August 2, 2023, from https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hierro-fe_18218.
- [8] Wikipedia. (2017). Iron bridge. In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/The_Iron_Bridge
- [9] Wikipedia. (2023). Convertidor Bessemer. In Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Bessemer
- [10] Materiales II. (n.d.). Hormigón_01._Historia (1). Retrieved August 2, 2023, from chrome-
- [11] Juan J. Moragues. (2022). Historia y Estética del Hormigón.
- [12] Hidden Architecture. (2016). Frontón Recoletos. Hidden Architecture. <http://hiddenarchitecture.net/fronton-recoletos/>
- [13] Amado, A. (2016, October 27). Clásicos de Arquitectura: Hipódromo de la Zarzuela / Carlos Arniches + Martín Domínguez + Eduardo Torroja.
- [14] Alexis Cárdenas Domínguez. (2020). Diseño y control del monitoreo de la corrosión en puente prefabricado de 32 m. 36–40.

[15] Comité Europeo de Normalización (CEN). (2011). UNE-EN 1992-1-1:2011. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

[16] Comisión Permanente del Hormigón. (2021). Código Estructural. Capítulo 9: Durabilidad de las estructuras de Hormigón.

[17] Duffo, G., & Farina, S. (2016). La corrosión de estructuras de hormigón armado: Principios básicos, monitoreo y prevención.

[18] Broomfield, J. P. (n.d.). Corrosion of steel in concrete: Understanding, Investigation and Repair (2nd ed.).

[19] González Moreno, J. A. (2016). Tipos de corrosión en materiales.

[20] García, F. de J. (n.d.). Corrosión del acero del refuerzo. Construcción y Tecnología En Concreto. <http://www.imcyc.com/revistacyt/oct11/artingenieria.html>

[21] José David Moreno Romero. (2016). Efectos del ambiente marino en edificios de segunda residencia.

[22] Joan Bonet. (2020, September 5). Corrosión en el hormigón armado: Corrosión galvánica.

[23] Corrosión del hormigón en el ambiente. (n.d.).

[24] Andrade, C., Martínez, C., Alonso, C., & Fullea, J. (n.d.). Nuevas técnicas avanzadas para la medida in situ de la corrosión en hormigón armado. Materiales de Construcción.

[25] Diccionario de lengua española. (2023, April 12). RAE. <https://dle.rae.es>

[26] anfapa. (n.d.). Métodos para reparar y proteger estructuras de hormigón deterioradas según la UNE EN 1504.

[27] Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, & Geocisa. (n.d.). Guía para la inspección y evaluación preliminar de estructuras de hormigón en edificios existentes.

[28] ASTM International. (2008). ASTM D6087-08: Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar.

[29] Hulanicku, A., Glab, S., & Ingman, F. (1991). Chemical sensors definitions and classification. *Pure and Applied Chemistry*, 63(1247–1250).

[30] Gandía Romero, J. M. (2014). Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/48516>

[31] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2010). UNE 112083:2010 Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado.

[32] Llorens, M., Serrano, Á., & Valcuende, M. (2019). Sensores para la determinación de la durabilidad de construcciones de Hormigón Armado. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 34(1).

[33] GeoLab. (n.d.). TEMLab. Retrieved November 26, 2023, from <https://www.geolab-srl.it/>

[34] Martínez, I., & Andrade, C. (2009). Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures. *ELSEVIER*, 31(8), 545–554.

[35] ASTM International. (2007). ASTM G109-07: Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments.

[36] ASTM International. (2015). ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

[37] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2010). UNE 112083:2010 Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado.

[38] Martínez, I., & Castillo, Á. (2018). Más allá de la rehabilitación en una obra emblemática: monitorización de las cubiertas del hipódromo de la Zarzuela = Beyond the rehabilitation in an emblematic work: monitoring the decks of the Zarzuela racecourse. *Anales de Edificación*, 4(2), 61. <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3780>

[39] Rover grupo. (n.d.). Finalización del proyecto Reshealience. <https://www.rovergrupo.com/es/noticia-detalle/finalizacion-del-proyecto-reshealience>

[40] WITEKLAB. (n.d.). Control y evaluación de la corrosión en hormigón armado. <https://www.witeklab.com/wp-content/uploads/2022/04/WITEKLAB-Corrochip-.pdf>

[41] Sorigué. (2022). Sorigué implementa sensores de alta tecnología en tres estructuras de la Agencia Catalana del Agua. <https://www.sorigue.com/es/sala-de-prensa/nota-de-prensa/sorigue-implementa-sensores-de-alta-tecnologia-en-tres-estructuras-de>

[42] Marques Hernández, A., & Martínez Serrano, J. (n.d.). Estudio Técnico, Análisis de Calidad de Materiales y Condiciones de Estabilidad, Seguridad Estructural y Durabilidad de la Estructura del Aparcamiento Subterráneo “Plaza de la Reina”, en la ciudad de Valencia.

[43] Ministerio de Fomento. (2018). Código Técnico de la Edificación.

[44] Calderón García, P. A., Luengo, E., & Buitrago, M. (2021). ANEJO DE ESTRUCTURAS DEL PROYECTO MODIFICADO DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DEL APARCAMIENTO DE LA PLAZA DE LA REINA EN VALENCIA.

[45] ASTM International. (2015). ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

[46] International Organization for Standardization (ISO). (2022). ISO 1266:2022 - Corrosion of steel in concrete - Electrochemical test methods.

[47] Ministerio de Fomento. (2022). Documento Básico HS1: Protección frente a la humedad (CTE).