



ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CURSO ACADÉMICO 2025 – 2026

**ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL
ASOCIADO AL RETRASO EN LA INTERVENCIÓN DE
DAÑOS POR CORROSIÓN:
TABLEROS DE VIGAS TIPO π**

Fabio Andrés López Roda

Dirigido por:

D. Raúl Rodríguez Escribano

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no nació como un resultado final, sino como un proceso constante de dudas, preguntas y reformulaciones. Agradezco a mi tutor por haber sabido orientar esas preguntas, cuestionar distintos enfoques y sacar lo mejor de mí para llevar a cabo este trabajo.

Agradezco también a los profesionales y colegas que, de forma directa o indirecta, compartieron sus conocimientos y experiencias. Ya que esto enriqueció de manera significativa este trabajo.

Quiero agradecer a mi familia y seres queridos por su apoyo constante durante el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios, por haber estado ahí cuando dudaba de mí mismo y acompañarme en este reto. Este proyecto no solo ha sido un ejercicio académico, sino una prueba personal de compromiso y perseverancia.

RESUMEN

El deterioro por corrosión de armaduras constituye la principal patología que afecta a las estructuras de hormigón armado, siendo responsable de la mayoría de las intervenciones de reparación estructural a lo largo de su vida útil. En redes tan extensas como lo es la red ferroviaria española, donde miles de puentes y pasos inferiores garantizan la continuidad del servicio, la gestión eficiente de las estructuras que presentan esta patología se convierte en un aspecto crítico desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el impacto económico y ambiental asociado al retraso en la intervención frente a la corrosión en tableros de vigas tipo π de hormigón armado y en base a dicha evaluación desarrollar una metodología práctica que permita mejorar la toma de decisiones y gestión de dichas estructuras. Para ello, se establece un sistema de estadios de degradación (F1 - F4) basado en criterios observables en inspección y en umbrales estructurales definidos.

A partir del análisis de un lote de estructuras que presentan dicha patología y el análisis de unidades de obra reales, se determina por un lado los costes unitarios de cada una de las actuaciones de reparación y por otro lado, se cuantifica el impacto ambiental de dichas actuaciones mediante el cálculo del potencial de calentamiento global.

La integración de estos elementos se plasma en una herramienta operativa de evaluación que permite al inspector determinar el estadio de degradación del tablero, el coste económico asociado, el impacto ambiental correspondiente y el tiempo estimado de transición entre un estadio de degradación y otro. Posteriormente, se aplica dicha herramienta a un caso real para validar su coherencia y aplicabilidad práctica.

Los resultados obtenidos evidencian que el retraso en la intervención no solo incrementa el coste económico de la reparación, sino que también supone un aumento significativo de la huella de carbono asociada. En consecuencia, el trabajo aporta una base técnica para justificar estrategias de mantenimiento preventivo y gestión sostenible del patrimonio estructural ferroviario.

ABSTRACT

Reinforcing steel corrosion is the main pathology affecting reinforced concrete structures, accounting for the majority of structural repairs throughout their service life. In networks as extensive as the Spanish railway network, where thousands of bridges and underpasses ensure the continuity of service, the efficient management of structures exhibiting this pathology becomes critical from a technical, economic and environmental perspective.

The main objective of this work is to evaluate the economic and environmental impact associated with delays in addressing corrosion in reinforced concrete π beam decks and based on this evaluation, to develop a practical methodology to improve decision making and management of these structures. To this end, a system of degradation stages (F1 - F4) is established based on criteria observable during inspection and defined structural thresholds.

Based on the analysis of a group of structures exhibiting this pathology and the analysis of actual construction work, the unit costs of each repair intervention are determined and the environmental impact of these interventions is quantified by calculating the global warming potential.

The integration of these elements is embodied in an operational assessment tool that allows the inspector to determine the stage of degradation of the railway deck, the associated economic cost, the corresponding environmental impact and the estimated transition time between one stage of degradation and another. Subsequently, this tool is applied to a real-world case to validate its consistency and practical applicability.

The results obtained demonstrate that delaying intervention not only increases the economic cost of the repair but also significantly increases the associated carbon footprint. Consequently, this work provides a technical basis for justifying preventive maintenance strategies and sustainable management of railway structural heritage.

Contenido

1. Introducción y justificación	1
1.1. Importancia de las estructuras de hormigón armado en la red ferroviaria española	1
1.2. La corrosión en armaduras como patología dominante en estructuras ferroviarias de hormigón armado	1
1.3. Objetivo del trabajo	2
1.3.1 Objetivos principales.....	2
1.3.2 Objetivos secundarios.....	3
2. Estado del arte	4
2.1. Tipologías de puentes de ferrocarril	4
2.1.1 Puentes y estructuras de paso de fabrica	4
2.1.2 Puentes y estructuras de paso metálicas.....	5
2.1.3 Puentes y estructuras de paso de hormigón pretensado	6
2.1.4 Puentes y estructuras de paso de vigas de hormigón armado	7
2.1.5 Puentes y estructuras de paso de vigas tipo π	8
2.1.6 Puentes y estructuras de paso de losa de carriles embebidos	9
2.1.7 Puentes y estructuras de paso de losa maciza de hormigón armado.....	9
2.1.8 Marcos prefabricados de hormigón armado	10
2.2. Conceptos generales de la corrosión	11
2.3. Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón.....	12
2.4. El ambiente alcalino y la capa pasivadora.....	14
2.5. Mecanismos de deterioro por corrosión	14
2.5.1. Carbonatación del hormigón	15
2.5.2. Ataque por cloruros	18
2.6 Efecto conjunto: Carbonatación y ataque por cloruros	20
2.7 Factores que aceleran la corrosión	21
2.8 Efectos de la corrosión sobre estructuras	23
2.8.1 Fisuración y desprendimiento del recubrimiento	23
2.8.2 Pérdida de sección eficaz del acero	24
2.8.3 Pérdida de adherencia acero-hormigón	25
2.8.4 Reducción de la sección resistente de hormigón.....	25
2.9. Modelos de evolución temporal de la corrosión	26
2.9.1 Las dos fases de Tuutti.....	26
2.9.2 Modelado de la Fase de iniciación (t_0): La penetración de cloruros	29
2.9.3 Modelado de la Fase de propagación (t_p): La penetración de cloruros	34
2.10. Técnicas de reparación y protección	40

2.10.1 Técnicas de reparación y protección para daños iniciales o localizados	40
2.10.2 Técnicas de reparación cuando hay pérdida de capacidad portante	44
2.10.3 Técnicas de protección superficial	49
2.11. Impacto ambiental de las reparaciones por corrosión en estructuras de hormigón.....	54
2.11.1 Introducción al impacto ambiental de materiales estructurales	54
2.11.2 Impacto ambiental de los materiales de reparación	56
2.11.3 Impacto de medios auxiliares en reparaciones.....	59
2.11.4 Gestión de residuos en reparaciones.....	61
2.11.5 Impacto ambiental secundario	63
2.11.6 Estrategias de mitigación	65
2.11.7 Datos ambientales y métricas de huella de carbono	67
2.12. Bases de precios para la evaluación económica de las intervenciones	71
2.12.1 Evaluación económica en conservación de infraestructuras ferroviarias	71
2.12.2 Cuadro de precios de ADIF.....	72
2.12.3 Base de precios de ADIF y descompuestos.....	73
2.12.4 Alcance de la valoración económica	74
2.12.5 Limitaciones del enfoque económico	75
3. Investigación	76
3.1. Identificación del gap de conocimiento	76
3.2. Metodología general de la investigación	77
3.3 Casos de estudio considerados	78
3.3.1 Origen de los casos de estudio.....	78
3.3.2 Tipología estructural y patología común.....	79
3.3.3 Relación de estructuras analizadas	79
3.4 Definición de tablas base de coste económico	81
3.4.1 Criterios generales de valoración económica	81
3.4.2 Selección de unidades de obra asociadas a la corrosión	82
3.4.3 Procedencia y actualización de precios unitarios y unidades de obra.....	83
3.4.3 Tablas base de costes unitarios.....	92
3.4.4 Alcance y limitaciones de la valoración económica	94
3.5 Definición de tablas base de impacto ambiental.....	94
3.5.1 Criterios generales de valoración ambiental.....	94
3.5.2 Alcance y límites del análisis ambiental.....	95
3.5.3 Metodología de cálculo del impacto ambiental.....	97
3.5.4 Procedencia de factores de emisión	98
3.5.5 Ejemplo de cálculo del impacto ambiental de una unidad de obra.....	100

3.5.6	Tablas base de impacto ambiental por unidad de obra	103
3.6	Estados de degradación por corrosión.....	105
3.6.1	Objetivo y alcance del sistema de estadios.....	105
3.6.2	Patologías e indicios inspeccionables a considerar	106
3.6.3	Métricas prácticas para cuantificar severidad.....	108
3.6.4	Análisis de casos reales y calibración preliminar	111
3.6.5	Definición operativa de los cuatro estadios de degradación	114
3.6.6	Árbol de decisión para la clasificación en inspección	117
3.7	Análisis temporal de transición entre estadios mediante un enfoque tipológico	121
3.7.1	Objetivo y criterios de aplicación.....	121
3.7.2	Hipótesis tipológicas para un tablero de vigas π	122
3.7.3	Representatividad de los diámetros empleados.....	124
3.7.4	Estimación del periodo de propagación t_p	124
3.7.5	Intensidad de corrosión según el modelo de Li (2004a)	125
3.7.6	Velocidad de penetración por corrosión y tratamiento del ataque localizado	125
3.7.7	Umbral temporal asociados a F1-F3 y criterio de gestión para F4.....	127
3.7.8	Calculo de la perdida de diámetro equivalente de las barras	128
3.7.9	Calculo del tiempo para alcanzar F1, F2 y F3 y tiempos de transición.....	129
3.7.10	Tiempos tipológicos para transición entre estadios	130
3.8	Metodología de cuantificación del coste económico y ambiental por estadio de degradación	131
3.8.1	Principio general de cálculo	131
3.8.2	Superficie afectada como variable de entrada	132
3.8.3	clasificación de las unidades de obra según su alcance.....	132
3.8.4	Cuantificación por estadio de degradación.....	134
3.8.5	integración con el análisis temporal	134
4.	Resultados	135
4.1	Ficha integrada de evaluación del estado de degradación	135
4.1.1	Planteamiento general	135
4.1.2	Definición del estadio de degradación.....	136
4.1.3	Toma y obtención de datos relevantes para la asignación de un estadio.....	137
4.1.4	Asignación de un estadio de degradación mediante un árbol de decisión	139
4.1.5	Estimación temporal de transición entre el estadio determinado y el siguiente	139
4.1.6	Valoración del coste económico e impacto ambiental de la intervención en base al estadio de degradación.....	140
5.	Validación de propuesta: Metodología por aplicación a casos reales	143

5.1 Caso real: Paso inferior sobre la carretera CR-502. Línea Puertollano-Refinería P.K. 3+075	143
5.1.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta	143
5.1.2 Coste económico real de la intervención	147
5.1.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)	148
5.2 Aplicación de la ficha del estado de degradación	150
5.3 Conclusiones en cuanto al impacto económico	153
5.4 Consideraciones sobre la validación del impacto ambiental	153
5.5 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta	154
6. Sostenibilidad	156
6.1 Enfoque general: Sostenibilidad en la gestión de infraestructuras ferroviarias	156
6.2 Integración del impacto ambiental en la toma de decisiones	156
6.3 Retraso en la intervención y aumento del impacto ambiental	157
6.4 Herramienta para la gestión sostenible del patrimonio	157
6.5 Alineación con las políticas europeas y alcance del análisis ambiental desarrollado	158
6.6 Conclusión del enfoque sostenible	158
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación	159
7.1 Síntesis de hallazgos principales	159
7.2 Aportación del trabajo	160
7.3 Implicaciones para la gestión del mantenimiento y conservación de infraestructuras	160
7.4 Limitaciones del estudio	161
7.5 Futuras líneas de investigación	162
7.6 Reflexión final	163
Bibliografía	1
ANEXO I: CÁLCULO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS UNIDADES DE OBRA ASOCIADAS CON LA REPARACIÓN DERIVADA DEL PROCESO DE LA CORROSIÓN	0
1. Objetivo del Anexo	1
2. Unidades de obra a calcular	1
2.1 Picado mecánico de superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte (m ²)	1
2.1.1 Definición de la unidad de obra	1
2.1.2 Criterio de valoración adoptado	2
2.1.3 Datos y factores de emisión	2
2.1.4 Cálculo del PCG unitario (kg CO ₂ eq/m ²)	3
2.2 Chorro de superficie mediante proyección de árido (m ²)	3
2.2.1 Definición de la unidad de obra	3
2.2.2 Criterio de valoración adoptado	4
2.2.3 Datos y factores de emisión	4

2.2.4 Cálculo del PCG unitario (kg CO ₂ eq/m ²).....	5
2.3 Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras (m ²).....	6
2.3.1 Definición de la unidad de obra	6
2.3.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP	6
2.3.3 Consumo de producto.....	6
2.3.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible.....	7
2.3.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO ₂ eq/m ²).....	8
2.4 Aplicación de inhibidor de corrosión (m ²).....	8
2.4.1 Definición de la unidad de obra	8
2.4.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP	8
2.4.3 Consumo de producto.....	9
2.4.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible.....	9
2.4.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO ₂ eq/m ²).....	9
2.5 Aplicación de pintura anticarbonatacion	10
2.5.1 Definición de la unidad de obra	10
2.5.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP	10
2.5.3 Consumo de producto.....	11
2.5.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible.....	11
2.5.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO ₂ eq/m ²).....	11
2.6 Laminado de fibra de carbono	12
2.6.1 Solución empleada usando CFRP en vigas de hormigón armado en π.....	12
2.6.2 Partida 1: Laminado de fibra de carbono (cara inferior del nervio).....	13
2.6.3 Partida 2: Hoja unidireccional 400 g/m ² (cara inferior y caras laterales del nervio).....	15
2.6.4 Ponderación final por caras del nervio	17
2.7 Tabla final con los PCG de todas las unidades consideradas	18
ANEXO II: FICHA INTEGRADA DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN.....	0
ANEXO III: VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA MEDIANTE LA APLICACIÓN A CASOS REALES.....	0
1.Objetivo del Anexo.....	1
2. Caso real: Puente sobre el Río Corbones. Línea Alcázar de San Juan–Sevilla P.K. 528+518	1
2.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta	1
2.2 Coste económico real de la intervención.....	4
2.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)	5
2.4 Aplicación de la ficha del estado de degradación	6
2.5 Conclusiones en cuanto al impacto económico.....	8
2.6 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta	8
3. Caso real: Puente sobre el río mayor. Línea Aranjuez-Utiel P.K. 100+370.....	10

3.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta	10
3.2 Coste económico real de la intervención.....	13
3.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)	14
3.4 Aplicación de la ficha del estado de degradación	14
3.5 Conclusiones en cuanto al impacto económico.....	17
3.6 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta	17

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Puente de fabrica línea Santander - Reinosa, Viaducto de Celada (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, ADIF, 2022)</i>	5
<i>Figura 2 Puente Internacional de Tuy sobre el río Miño, de tipo celosía (Silva, 2011)</i>	6
<i>Figura 3 Viaducto Val de Castejón, en Peñalba – Huesca (Fernandez A. , 2023)</i>	7
<i>Figura 4 Puente sobre el torrente La Gavarra en Centelles, Barcelona (Fernandez A. , 2023)</i>	8
<i>Figura 5 Puente sobre la Riera de Palau (Can Trias) (Fernandez A. , 2023)</i>	8
<i>Figura 6 Puente sobre fondo de L'Espariguera en Arbeca, Lérida (Fernandez A. , 2023)</i>	9
<i>Figura 7 Paso inferior Cami de Granyana, Lérida (Fernandez A. , 2023)</i>	10
<i>Figura 8 Paso inferior tipo marco en Osera de Ebro (Fernandez A. , 2023)</i>	10
<i>Figura 9 Como ocurre la corrosión en una pieza de acero sumergida en agua (Mays, 1992)</i>	12
<i>Figura 10 Proceso electroquímico de la corrosión de las armaduras (Rodríguez Escribano, 2024)</i>	13
<i>Figura 11 Diagrama de Pourbaix simplificado para el hierro en hormigón (ACI 222R-01, 2001)</i>	14
<i>Figura 12 Principales mecanismos de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón. (Rodríguez & Andrade, 2001)</i>	15
<i>Figura 13 Dibujo esquemático de la difusión del dióxido de carbono en el concreto (Tuutti, 1982)</i>	16
<i>Figura 14 Diferenciación de las tres zonas durante el proceso de carbonatación (Liang, Huang, & Fang, Carbonation Service Life Prediction of Existing Concrete Viaduct/ Bridge Using Time-dependent Reliability Analysis, 2013)</i>	17
<i>Figura 15 Etapas de la corrosión inducida por la carbonatación (Emerson, Lombardi, Lavinicki, & de Castro, 2024)</i>	18
<i>Figura 16 corrosión del acero embebido en hormigón por ataque de cloruros. (Rodríguez & Andrade, 2001)</i>	18
<i>Figura 17 Efectos de la corrosión por cloruros en ambiente marino. (Dirección General de Carreteras, 2012)</i>	19
<i>Figura 18 Efectos de la corrosión por cloruros en una pila con sales fundentes. (Dirección General de Carreteras, 2012)</i>	19
<i>Figura 19 corrosión por aireación diferencial (Genesca, 1989)</i>	22
<i>Figura 20 Volumen relativo que ocupa el hierro en comparación con los volúmenes de sus distintos productos de corrosión u óxidos (ACI 222R-19, 2019)</i>	23
<i>Figura 21 Diferentes estados de fisuración del recubrimiento (Rodríguez, Anaya, Andrade, & Martín, 2020)</i>	24
<i>Figura 22 Corrosión severa en vigas con pérdida de recubrimiento (Peiren, 2007)</i>	26
<i>Figura 23 Esquema de la secuencia de corrosión del acero en concreto (Tuutti, 1982)</i>	27
<i>Figura 24 Resumen de los resultados obtenidos para los 32 casos de estudio (Vázquez Fernández, 2020)</i>	37
<i>Figura 25 Corrosión homogénea (Pav) y máxima profundidad de ataque (Pmax) (Rodríguez & Andrade, 2001)</i>	39
<i>Figura 26 Sistemas de protección catódica: ánodos de sacrificio y corriente impuesta (Andrade, Ortín, Soldevila, & Orte, 2024)</i>	41
<i>Figura 27 Colocación de ánodo de sacrificio para posterior aplicación de mortero de reparación sobre la zona (Andrade, Ortín, Soldevila, & Orte, 2024)</i>	41
<i>Figura 28 Disposición de ánodos de sacrificio en el perímetro de la zona de reparación (Jimenez, 2019)</i>	42
<i>Figura 29 Detalle de la instalación de ánodos de corriente impuesta tipo malla en un pilar y viga antes de la aplicación del mortero de reparación (Andrade, Ortín, Soldevila, & Orte, 2024)</i>	43
<i>Figura 30 Presentación de los laminados de fibra de carbono (Lopez, 2012)</i>	45
<i>Figura 31 Presentación y aplicación de los tejidos de fibra de carbono (Lopez, 2012)</i>	45
<i>Figura 32 Aplicación de adhesivo estructural en refuerzo FRP (SIKA, 2025)</i>	46
<i>Figura 33 Representación de diferentes comportamientos de fachadas frente a la acción del agua. (A) Pared sin protección, (B) Pared hidrofugada en la que se forma una película superficial que reduce la entrada del agua líquida, permitiendo el intercambio de vapor de agua con el ambiente, (C) Pared impermeabilizada. (Mosquera, 2013)</i>	50
<i>Figura 34 Esquema de un estado (1) previo a la deformación del hormigón base y el mortero epoxi, posteriormente un estado (2) donde se ve como la dilatación de uno y otro son diferentes y finalmente un estado (3) resultante de la aplicación de este sistema (Canovas, 1967)</i>	51

<i>Figura 35 Viaje de los iones a través del hormigón atraídos por las áreas anódicas y catódicas de la armadura metálica debido a sus cargas "+" y "-"</i> (Quimilock, 2019)	53
<i>Figura 36 Grafica comparativa del poder de inhibición de la corrosión de diferentes tipos de inhibidores frente a un control</i> (Quimilock, 2019)	54
<i>Figura 37 Producción y emisiones de CO2 para los materiales estructurales principales en gigatoneladas</i> (Purnell, 2013)	55
<i>Figura 38 Desvío de cada uno de los cuatro planes del caso de estudio</i> (Ma, Liu, & Li, 2023)	64
<i>Figura 39 Impactos ambientales para un inhibidor de corrosión</i> (GCP Applied Technologies Inc., 2022)	70
<i>Figura 40 Precio descompuesto de la unidad "Reconstrucción de sección de hormigón"</i> (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2025)	73
<i>Figura 41 Precio descompuesto de la unidad "Pintura anticarbonatacion"</i> (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2025)	74
<i>Figura 42 Esquema donde se muestran los dos mecanismos resistentes.</i>	88
<i>Figura 43 Superficie a tomar en cuenta en una estructura formada por una viga π</i> (elaboración propia)	109
<i>Figura 44 Superficie a tomar en cuenta en una estructura formada por dos vigas π</i> (elaboración propia)	109
<i>Figura 45 Arbol de decisión para la clasificación del estado de degradación por corrosión en tableros de vigas tipo π. Elaboración propia</i>	119
<i>Figura 46 Tabla A12.4.1 Velocidad de corrosión</i> (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)	123
<i>Figura 47 Corrosión homogénea (P_{av}) y máxima profundidad de ataque (P_{max})</i> (Rodriguez & Andrade, 2001)	126
<i>Figura 48 Superficies a tomar en cuenta al momento de ponderar el refuerzo CFRP de una viga π</i> (elaboración propia)	133
<i>Figura 49 Árbol de decisión para la asignación del estadio de degradación</i> (elaboración propia)	139
<i>Figura 50 Cuatro dimensiones a tomar en cuenta para la toma de decicion.</i> Elaboración propia.	160
<i>Figura 51 Tabla de resultados para el caso 2.1 Dry Sand in Bulk</i> (EPD EN 15804, 2020)	5
<i>Figura 52 Disposición de refuerzo CFRP tanto longitudinal como transversalmente</i> (Fernandez A. , 2023)	12

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	31
<i>Tabla 2 para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	31
<i>Tabla 3 Parámetros a y b para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	31
<i>Tabla 4 Estimación del contenido de cloruros en la superficie de hormigón (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	33
<i>Tabla 5 Valores indicativos del coeficiente de difusión de cloruros aparente obtenidos con la norma NT BUILD 492 (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	33
<i>Tabla 6 Coeficiente de envejecimiento (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	33
<i>Tabla 7 Contenido límite de ion cloruro C_{th} (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	34
<i>Tabla 8 Velocidad de corrosión (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)</i>	38
<i>Tabla 9 Comparación entre un hormigón normal y un mortero de reparación. Elaboración propia</i>	57
<i>Tabla 10 Principales componentes del producto. (PROPAMSA, Declaracion Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparacion., 2021)</i>	57
<i>Tabla 11 Impactos ambientales para un mortero de reparación. (PROPAMSA, Declaracion Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparacion., 2021)</i>	69
<i>Tabla 12 Potencial de Calentamiento Global para el Planitop Rasa & Ripara R4 Zero (MAPEI, 2025)</i>	101
<i>Tabla 13 Variaciones del Índice de Precios al Consumo (INE, 2025)</i>	148
<i>Tabla 14 Resultados de impacto ambiental por unidad declarada (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Morteros para pasivacion de armaduras y proteccion anticorrosion, productos para pasivacion y proteccion del acero, 2019)</i>	7
<i>Tabla 15 Resultados de impacto ambiental para el producto Drizoro Composite (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022)</i>	14
<i>Tabla 16 Resultados de impacto ambiental para el producto Drizoro Wrap (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022)</i>	16

1. Introducción y justificación

1.1. Importancia de las estructuras de hormigón armado en la red ferroviaria española

La red ferroviaria española constituye una de las infraestructuras de transporte más extensas y estratégicas del país, desempeñando un papel clave en la movilidad de personas y mercancías, la cohesión territorial y la competitividad económica. Dicha red de apoya en un elevado número de estructuras como puentes, pasos inferiores, pasos superiores y viaductos, muchas de estas estructuras construidas en hormigón armado y diseñadas para dar continuidad y seguridad al servicio ferroviario.

Según datos del administrador de infraestructuras ferroviarias, la red gestionada por ADIF y ADIF alta velocidad cuenta con una vasta red que incluye más de 13.000 pasos superiores e inferiores y cerca de 1.500 puentes de mayor entidad (ADIF, 2025). Poniendo así en manifiesto la magnitud del patrimonio estructural ferroviario existente en España.

En la misma línea, cada una de las estructuras que componen esta red están sometidas a exigentes condiciones de servicio, tanto desde el punto de vista estructural como funcional, requiriendo así elevados niveles de seguridad, fiabilidad y durabilidad.

Una parte significativa de este parque estructural fue construida a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, coincidiendo con periodos de fuerte expansión de la red ferroviaria. Como consecuencia, muchas de estas estructuras tienen edades actuales superiores a los 30 y 40 años, suponiendo una entrada en una fase de su vida útil en la que los procesos de deterioro comienzan a manifestarse con mayor frecuencia e intensidad (CEDEX, 2018). Debido a esto, la conservación, mantenimiento y reparación de las estructuras ferroviarias se ha convertido en un aspecto crítico de la gestión de infraestructuras, requiriendo una inversión importante destinada cada año a inspecciones, actuaciones preventivas y reparaciones.

El impacto de una gestión inadecuada o tardía supondría un impacto enorme en la red, ya que, a diferencia de otras infraestructuras de transporte, cualquier afección estructural puede traducirse de manera repentina en restricciones de velocidad, interrupciones del servicio o incluso el cierre de líneas, con consecuencias económicas y sociales inmediatas y catastróficas para el sistema (UIC, 2016). Por ello, disponer de herramientas que permitan anticipar el deterioro y optimizar el momento de intervención resulta esencial para garantizar la seguridad, la continuidad del servicio y la eficiencia en el uso de los recursos públicos.

1.2. La corrosión en armaduras como patología dominante en estructuras ferroviarias de hormigón armado

Entre los distintos mecanismos de deterioro que afectan a las estructuras de hormigón armado, la corrosión de las armaduras se reconoce de forma generalizada como la patología más frecuente y con mayor impacto técnico y económico. Diversas investigaciones apuntan a que la corrosión es responsable de entre el 60% y 80% de las intervenciones de reparación estructural en este tipo de infraestructuras, situándola de este modo como la principal causa de degradación a lo largo de su vida útil (Feliu & Andrade, 1989).

La corrosión de las armaduras se produce fundamentalmente como consecuencia de la presencia de cloruros y la carbonatación del hormigón, debido principalmente al ambiente al que está sometida la estructura. Estos procesos provocan la pérdida de la capa pasiva que protege al acero, dando lugar a una expansión de los productos de corrosión, fisuración y desprendimiento del recubrimiento, incluso en fases más avanzadas, a una pérdida significativa de sección resistente de las armaduras (CEDEX, 2018).

En el ámbito ferroviario, estos mecanismos presentan además características específicas que pueden agravar sus efectos. De entre los más comunes se cuenta con vibraciones continuas asociadas al paso de trenes que favorece la aparición y propagación de fisuras en el recubrimiento, facilitando la entrada de agentes agresivos (UIC, 2016). Asimismo, en líneas electrificadas puede existir un riesgo de corrosión de tipo electrolítico, mientras que en pasos inferiores son habituales condiciones de elevada humedad y sometimiento de la estructura a ciclos de mojado-secado que aceleran los procesos corrosivos (ADIF, 2025).

Las consecuencias de corrosión en estructuras ferroviarias son críticas, ya que incluso daños aparentemente moderados pueden comprometer la geometría de la vía, afectando de manera directa a la seguridad de la circulación. En diversos casos, la detección de daños obliga a adoptar medidas inmediatas en contra de una explotación normal, como las ya mencionadas limitaciones de velocidad o en casos más relevantes el corte de la línea, implicando un impacto económico muy superior al coste de una intervención temprana (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, ADIF, 2022).

En este contexto, resulta fundamental no solo identificar la presencia de corrosión, sino comprender la evolución del daño en el tiempo y las implicaciones económicas y ambientales asociadas a I retraso en la intervención, necesidad que constituye la base y la motivación principal del presente trabajo.

1.3. Objetivo del trabajo

1.3.1 Objetivos principales

El presente trabajo tiene como objetivos principales:

- Desarrollar un marco metodológico que permita vincular el estado de degradación de la estructura con sus consecuencias económicas y medioambientales, facilitando la toma de decisiones en la gestión y conservación de infraestructuras ferroviarias.
- Evaluar cómo el retraso en la intervención frente a procesos de corrosión en estructuras de hormigón armado afecta a los costes económicos, dando lugar a reparaciones más complejas, un mayor volumen de actuaciones, un mayor plazo de ejecución y afecciones a la explotación de la infraestructura.
- Analizar el impacto del retraso en la intervención desde un punto de vista medioambiental, ya que este retraso implica un mayor consumo de materiales para hacer frente a las afecciones causadas, un incremento en el uso de energía asociada a reparaciones más intensivas y la mayor generación de residuos.

1.3.2 Objetivos secundarios

Con el fin de alcanzar los objetivos principales definidos, el trabajo se apoya en una serie de objetivos secundarios, de carácter metodológico y aplicado, que permiten estructurar el análisis y garantizar la coherencia de los resultados objetivos. Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Realizar una revisión del estado del arte sobre los procesos de corrosión en estructuras de hormigón armado, los modelos de propagación de la corrosión y las estrategias habituales de reparación y refuerzo en infraestructuras ferroviarias.
- Identificar y caracterizar las patologías asociadas a la corrosión más frecuentes en tableros de vigas tipo π , a partir del análisis de informes de inspección y reparación de puentes y pasos inferiores de la red ferroviaria.
- Definir un sistema de estadios de degradación por corrosión, basado en indicadores observables durante una inspección, este sistema permite clasificar de manera objetiva el estado del elemento estructural.
- Establecer tablas base de costes económicos asociadas a las principales unidades de obra empleadas en la reparación y refuerzo de estructuras afectadas por corrosión, utilizando como referencia la Base de Precios de Adif (BPA).
- Desarrollar un enfoque simplificado para la estimación del impacto ambiental, expresado en términos de potencial de calentamiento global (kg CO₂ equivalente), a partir de declaraciones ambientales de producto y factores de emisión representativos.
- Analizar la evolución temporal del daño por corrosión mediante modelos de propagación, con el objetivo de estimar el tiempo medio de transición entre los distintos estadios de degradación cuando no se actúa sobre la estructura.
- Aplicar la metodología propuesta a casos reales, evaluando el incremento de los costes económicos y del impacto ambiental asociado al retraso en la intervención.

2. Estado del arte

En esta sección se aborda el conocimiento actual que se tiene acerca de las tipologías más frecuentes de puentes de hormigón armado de ferrocarril que son las que posteriormente, con el paso del tiempo, se ven afectadas por el fenómeno de la corrosión.

Además de eso, se abordan los mecanismos de deterioro por corrosión y las causas que generan este fenómeno. Así como los costes asociados tanto económicos como medioambientales a esta patología que está presente en la mayoría de las estructuras, ya que para poder intervenir y reparar las estructuras afectadas se debe dedicar una enorme cantidad de recursos cada año, garantizando la funcionalidad y seguridad de dichos elementos.

Según distintas fuentes, la corrosión en países industrializados como España supone pérdidas de entre el 2.5% y el 3.5% del PIB (CENIM, 2021), superando en España los 12.000 millones de euros cada año.

Estas cifras suponen prestar especial atención a los procesos que causan este fenómeno y también a la manera en la que se gestiona este problema una vez se ha detectado el daño y los modelos de evolución temporal dedicados a este fenómeno, ya que esta patología evoluciona a través del tiempo y con el pasar de los años supone un mayor coste tanto económico como medioambiental al momento de reparar y volver a poner en servicio los elementos afectados.

Es por eso que a continuación se detallan los mecanismos de deterioro por corrosión más comunes, los modelos de evolución temporal de la corrosión donde se identifican los factores que influyen en la velocidad del deterioro, las técnicas de reparación y protección de los elementos afectados y el impacto medioambiental y económico de estas reparaciones.

2.1. Tipologías de puentes de ferrocarril

La red ferroviaria gestionada por ADIF cuenta con un amplio y heterogéneo conjunto de estructuras de paso, resultado de más de un siglo de desarrollo en la infraestructura ferroviaria de España. Estas estructuras incluyen tanto puentes como pasos inferiores ejecutados mediante distintas técnicas constructivas que reflejan la evolución a través del tiempo de los materiales, las técnicas de cálculo, las técnicas de ejecución y las condiciones económicas de cada periodo por el que se ha atravesado a lo largo de la historia.

En el contexto del presente trabajo, resulta necesario describir las tipologías más representativas con el fin de contextualizar el fenómeno de la corrosión y delimitar aquellas en las que se centra el análisis del impacto económico y ambiental asociado al retraso de las reparaciones y aquellas que quedan fuera del alcance del presente trabajo.

2.1.1 Puentes y estructuras de paso de fábrica

Los puentes y estructuras de paso de fábrica, ejecutados generalmente en arcos y bóvedas de mampostería, sillería o ladrillo constituyen una de las tipologías más antiguas y comunes de

la red ferroviaria de España. Estas estructuras fueron ampliamente utilizadas en los primeros desarrollos del ferrocarril y presentan un comportamiento estructural basado en la compresión. Sus principales mecanismos de deterioro están asociados a procesos de degradación de los materiales pétreos, filtraciones de agua, asentos diferenciales o pérdida de material en juntas y no así a la corrosión de armaduras ya que estas no se encuentran presentes en esta tipología. (Arenas & Ortega, 2001)



Figura 1 Puente de fábrica línea Santander - Reinosa, Viaducto de Celada (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, ADIF, 2022)

2.1.2 Puentes y estructuras de paso metálicas

Los puentes ferroviarios hechos íntegramente mediante acero estructural representan otra tipología histórica relevante en la red ferroviaria española, especialmente en tramos construidos entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX.



Figura 2 Puente Internacional de Tuy sobre el río Miño, de tipo celosía (Silva, 2011)

Estas estructuras están sujetas a procesos de corrosión atmosférica, que afectan directamente al material resistente y requieren técnicas y estrategias de evaluación, mantenimiento y protección específicas. Estas últimas difieren de manera sustancial frente a las técnicas utilizadas en las estructuras de hormigón armado.

2.1.3 Puentes y estructuras de paso de hormigón pretensado

El empleo del hormigón pretensado supuso en un momento un avance significativo en el diseño de puentes ferroviarios, permitiendo salvar mayores luces mediante tipologías como los puentes de cajón o los puentes de vigas pretensadas. Estas estructuras están ampliamente representadas en la red gestionada por ADIF especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX.

No obstante, la presencia de armaduras activas introduce mecanismos de deterioro específicos, así como soluciones de reparación, costes económicos e impactos ambientales claramente diferenciados de los correspondientes al hormigón armado convencional.



Figura 3 Viaducto Val de Castejón, en Peñalba – Huesca (Fernandez A. , 2023)

2.1.4 Puentes y estructuras de paso de vigas de hormigón armado

Los puentes de vigas de hormigón armado constituyen una de las tipologías más habituales en la red ferroviaria convencional, especialmente en estructuras construidas en la primera mitad del siglo XX. Estas vienen resueltas mediante el uso vigas principales de hormigón armado y una losa superior, presentando zonas especialmente sensibles a la corrosión, como el intradós de las vigas, las juntas entre vano y vano y las áreas próximas a los apoyos.

La ausencia de pretensado, los recubrimientos reducidos de ese momento y la antigüedad que tienen por si mismas estas estructuras hacen que sean particularmente vulnerables a procesos de corrosión de las armaduras, conllevando a un incremento de costes e impacto ambiental de manera progresiva a través del tiempo.



Figura 4 Puente sobre el torrente La Gavarra en Centelles, Barcelona (Fernandez A. , 2023)

2.1.5 Puentes y estructuras de paso de vigas tipo π

Estas estructuras están conformadas por una losa superior y alas laterales que configuran una sección en forma de π . Fueron construidas mayoritariamente en épocas con escasos requisitos de durabilidad, presentando con bastante frecuencia problemas de drenaje y acumulación de agua en el intradós. La combinación de la elevada antigüedad, recubrimientos reducidos y condiciones ambientales desfavorables favorecen a la aparición de estados avanzados de corrosión generalizada, lo que convierte esta tipología en un caso especialmente representativo para el análisis del impacto económico y ambiental asociado al retraso de las reparaciones debido a los efectos de la corrosión.



Figura 5 Puente sobre la Riera de Palau (Can Trias) (Fernandez A. , 2023)

2.1.6 Puentes y estructuras de paso de losa de carriles embebidos

Durante el periodo de la guerra civil y la posguerra, la escasez de acero estructural dio lugar al empleo de soluciones singulares, entre las que destacan los puentes de losa con carriles ferroviarios embebidos. En estas estructuras, los carriles se utilizaron como elementos resistentes a flexión, quedando posteriormente hormigonados para formar así una losa de hormigón maciza.

La antigüedad de estas estructuras y la ausencia de criterios modernos de durabilidad hacen que presenten con frecuencia procesos avanzados de corrosión en los carriles embebidos.



Figura 6 Puente sobre fondo de L'Espariguera en Arbeca, Lérida (Fernandez A. , 2023)

2.1.7 Puentes y estructuras de paso de losa maciza de hormigón armado

Los puentes de losa maciza de hormigón armado constituyen una tipología ampliamente utilizada en pasos ferroviarios con una luz pequeña/mediana. Esta tipología, de concepción sencilla y generalmente no pretensada, presenta amplias superficies expuestas a ambientes agresivos ya agentes que desencadenan de manera más rápida el proceso de la corrosión. Esta última suele manifestarse de forma generalizada, dando lugar a pérdidas de recubrimiento y la necesidad de intervenciones extensas.



Figura 7 Paso inferior Cami de Granyana, Lérida (Fernandez A. , 2023)

2.1.8 Marcos prefabricados de hormigón armado

Los marcos prefabricados de hormigón armado son una solución especialmente habitual en pasos inferiores ferroviarios con cruces de pequeña entidad. Estas estructuras, frecuentemente enterradas o semienterradas, trabajan en ambientes con elevada humedad y posibles filtraciones, condiciones que favorecen la aparición de procesos de corrosión de armaduras.



Figura 8 Paso inferior tipo marco en Osera de Ebro (Fernandez A. , 2023)

2.2. Conceptos generales de la corrosión

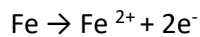
La corrosión constituye un fenómeno electroquímico complejo que implica la degradación gradual del material metálico que interactúa con el medio ambiente que la rodea.

Esta corrosión sigue los principios fundamentales de la electroquímica donde hay una transferencia de electrones. Según Jones “todos los procesos de corrosión en medios acuosos son de naturaleza electroquímica, requiriendo la presencia de un ánodo, un cátodo, un electrolito y una conexión eléctrica” (Jones, 1996)

El ánodo es la zona donde se produce la corrosión del metal o proceso de oxidación. Esta libera electrones en forma de iones que pasan a formar parte del electrolito. Este proceso siempre tiene la fórmula general:

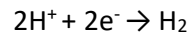


Esta fórmula aplicada en el caso del hierro quedaría:

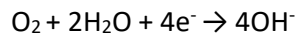


Por otro lado, tenemos la zona catódica donde se produce la reacción de reducción. Esta reacción consume los electrones liberados por el metal.

En medios ácidos donde la reducción es de iones hidrogeno se tiene la forma:



Y en presencia de oxígeno, siendo la más común en ambientes húmedos y al aire libre se tiene la siguiente forma:



Finalmente, aparte del ánodo y cátodo se necesita un camino o puente que permita que los iones se muevan, completando así la reacción electroquímica. Aquí es donde entra el electrolito, siendo una sustancia capaz de permitir el flujo de iones, cerrando así el circuito eléctrico.

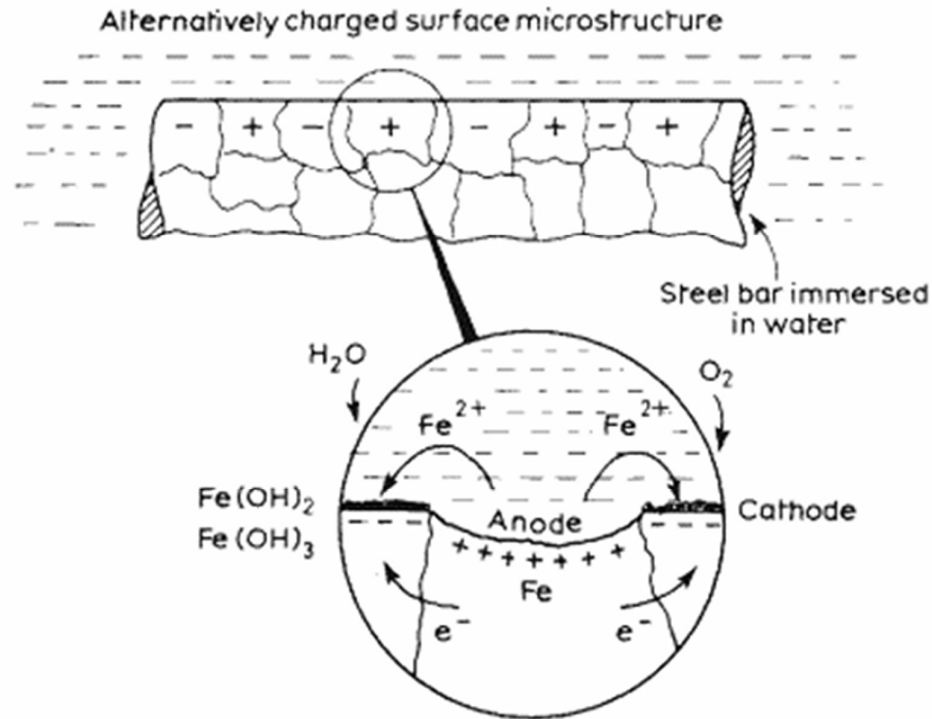


Figura 9 Como ocurre la corrosión en una pieza de acero sumergida en agua (Mays, 1992)

Habiendo entendido los principales conceptos y agentes de la corrosión, así como el papel de cada uno de ellos, ya podemos focalizar este fenómeno en las estructuras de hormigón ya que estas tienen ciertas particularidades.

2.3. Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón

Si bien los principios comentados anteriormente son principios generales presentes en la corrosión, cuando se añade a la ecuación un entorno de hormigón surgen ciertas particularidades y características que inciden de manera significativa en el inicio y propagación del proceso de corrosión. Donde la durabilidad de la estructura depende de la capacidad del hormigón para mantener el acero de refuerzo en un estado pasivo, dicho estado se ve comprometido principalmente por dos mecanismos presentes en la corrosión: la carbonatación y el ataque por cloruros (estos mecanismos se explican en el apartado 2.3)

Por otro lado, la pasta de hormigón que por sí misma no es homogénea y a la vez contiene discontinuidades. Tiene una naturaleza porosa formada por poros conectados entre sí, dichos huecos son los que alojan y transportan líquidos (H_2O) y gases (O_2) que forman uno de los actores principales en el proceso de la corrosión, el electrolito. (Vazquez Fernandez, 2020)

Dichas discontinuidades propias de la matriz porosa de la pasta de hormigón se agravan aún más cuando se añade a la ecuación una puesta en obra inadecuada, colocación de aditivos que afectan las estructuras intercrystalinas de la pasta y factores medioambientales que también influyen en el incremento de este fenómeno.

A continuación, se presenta de manera esquemática la celda electroquímica de corrosión que se establece en una armadura de hormigón:

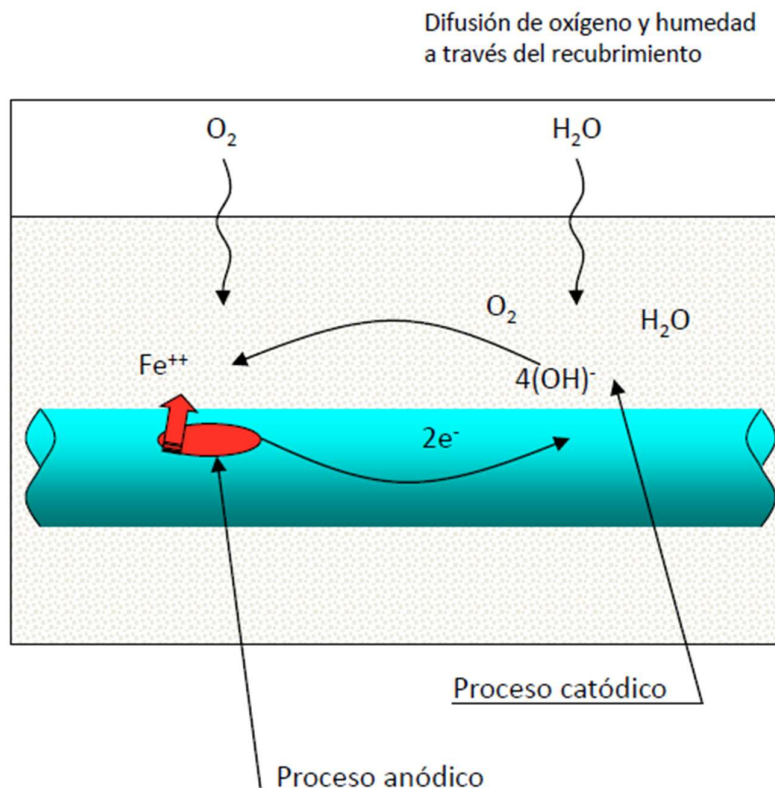


Figura 10 Proceso electroquímico de la corrosión de las armaduras (Rodríguez Escribano, 2024)

En este esquema podemos observar por un lado el proceso anódico donde el hierro (Fe) se oxida y se disuelve en el electrolito (solución almacenada en la matriz porosa del hormigón), perdiendo así dos electrones y convirtiéndose en ion ferroso (Fe^{++}) que pasa a la solución y los electrones liberados ($2e^-$) fluyen a través del propio metal.

Y por otro lado se tiene el proceso catódico, donde el oxígeno (O_2) disuelto en la humedad de los poros del hormigón, reacciona con el agua y electrones para formar iones hidroxilo (OH^-). Esto ocurre siempre y cuando el oxígeno y la humedad se difunden a través del recubrimiento hasta llegar a la superficie de la barra.

Finalmente, para que el circuito eléctrico se cierre los electrones generados en el ánodo fluyen a través del metal hasta llegar al cátodo ($2e^-$). Y los iones positivos (Fe^{++}) generados en el ánodo y los iones negativos (OH^-) generados en el cátodo se mueven a través del electrolito para mantener la neutralidad eléctrica.

En algún punto estos iones se encontrarán y formarán la herrumbre, un producto derivado del proceso de la corrosión.

2.4. El ambiente alcalino y la capa pasivadora

El hormigón posee una alta alcalinidad, con un pH que varía entre un 12.5 y un 13.5, esto gracias a la presencia del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y otros hidróxidos alcalinos. En este ambiente alcalino el acero forma una capa pasivadora extremadamente fina (de 2 a 10 nm) compuesta principalmente por óxidos férricos mixtos (Broomfield, 2007). Esta película actúa como una barrera que frena de manera efectiva la velocidad de la reacción anódica del hierro, reduciendo así la tasa de corrosión a niveles insignificantes.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Pourbaix para el hierro, donde para el pH original del hormigón los estados más comunes son de protección o de pasivación, donde este último es más frecuente debido al potencial que presentan las armaduras. Concluyendo así que la mayor parte de las veces las estructuras de hormigón armado se encuentran exentas de corrosión siempre y cuando la capa pasiva se mantenga.

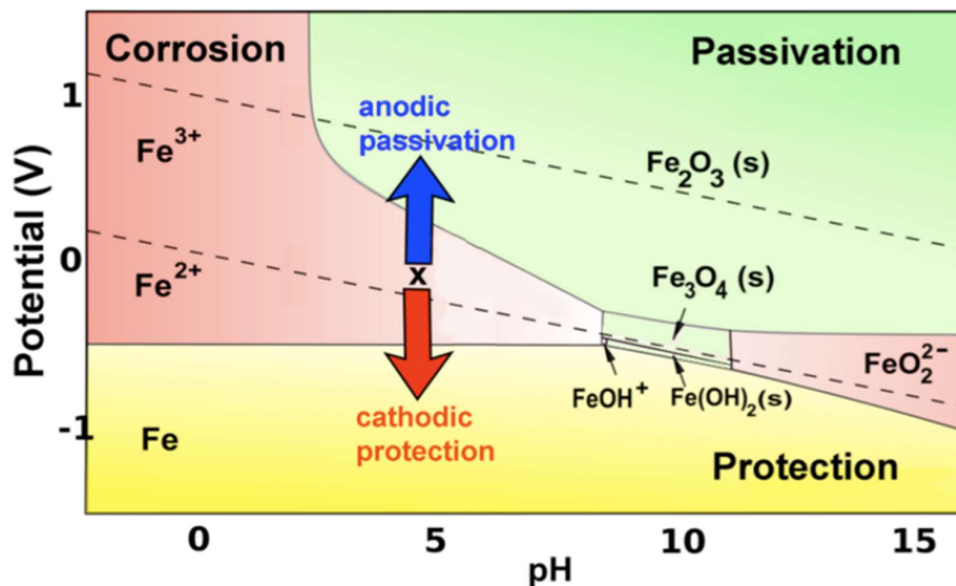


Figura 11 Diagrama de Pourbaix simplificado para el hierro en hormigón (ACI 222R-01, 2001)

2.5. Mecanismos de deterioro por corrosión

Como se ha establecido, la corrosión es un proceso electroquímico que solo puede iniciarse cuando fallan los mecanismos de protección del hormigón. La clave de esta protección reside en dos factores: La elevada alcalinidad del medio, que promueve la formación de una capa pasivadora y la baja permeabilidad del recubrimiento, que actúa como barrera física frente a la entrada de agentes agresivos (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Rob, 2004).

Los dos mecanismos principales que debilitan poco a poco y acaban destruyendo esta protección iniciando así la corrosión son la carbonatación y el ataque por cloruros. La carbonatación induce a la corrosión generalizada del acero debido a una bajada del pH del medio que hace que el acero pierda el estado de pasivación en el que antes se encontraba y el ataque por cloruros produce una corrosión localizada. (Rodríguez & Andrade, 2001)

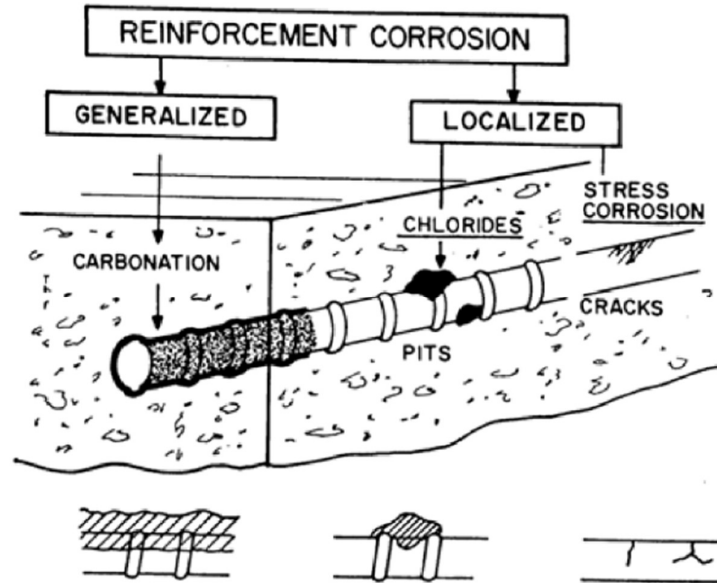


Figura 12 Principales mecanismos de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón. (Rodríguez & Andrade, 2001)

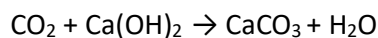
Y si bien ambos mecanismos conducen a la despasivación del acero, sus implicancias en la cinética del proceso y la morfología del ataque son notablemente diferentes, como se desarrollará en los siguientes subapartados.

2.5.1. Carbonatación del hormigón

El proceso de carbonatación del hormigón representa uno de los mecanismos de deterioro más extendidos principalmente en estructuras situadas en ambientes urbanos e industriales donde la concentración de CO_2 es más elevada.

Este es un proceso natural que ocurre cuando el dióxido de carbono de la atmósfera penetra en el hormigón desde la superficie exterior hacia el interior del hormigón a través de su sistema de poros y reacciona con los hidróxidos alcalinos (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Rob, 2004).

La reacción química sería la siguiente:



Este proceso reduce el pH del hormigón de un valor inicial de 13 aproximadamente a un valor inferior que sonda un pH de 9 o inferior. Esta reducción de pH lo que hace es destruir la capa pasiva protectora que se forma naturalmente sobre el acero en un medio alcalino, ocasionando que la velocidad de la carbonatación crezca rápidamente dependiendo de:

- Permeabilidad del hormigón: Relacionada directamente con la relación agua/cemento
- Condiciones ambientales: Humedad relativa
- Espesor de recubrimiento: Influye en el tiempo de iniciación
- Tipo de cemento: Tipo de aditivos que contenga

Para ver como cada uno de estos factores afecta a la velocidad de la carbonatación se muestra a continuación una figura donde se ve como la humedad relativa influye directamente en este fenómeno.

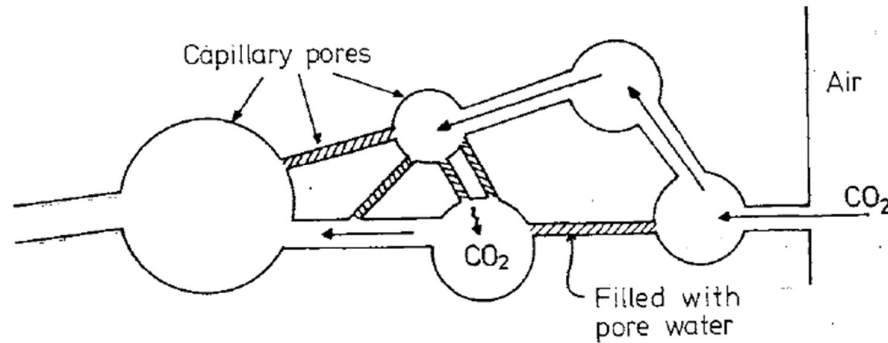


Figura 13 Dibujo esquemático de la difusión del dióxido de carbono en el concreto (Tuutti, 1982)

En dicha figura se ve que la estructura de poros presenta dos situaciones simultáneas donde por una parte los poros grandes llenos de aire actúan como canales de transporte para el CO₂, permitiendo que dicho gas avance profundamente y por otra parte los poros más pequeños llenos de agua dificultan la difusión del CO₂, donde para poder seguir su camino debe difundirse a través de la solución acuosa.

Con este ejemplo se hace notar también que es un proceso que ocurre desde las zonas más externas del hormigón hacia el interior hasta alcanzar la armadura. Diversos autores coinciden en que este fenómeno presenta tres zonas: zona carbonatada, zona parcialmente carbonatada y zona no carbonatada.

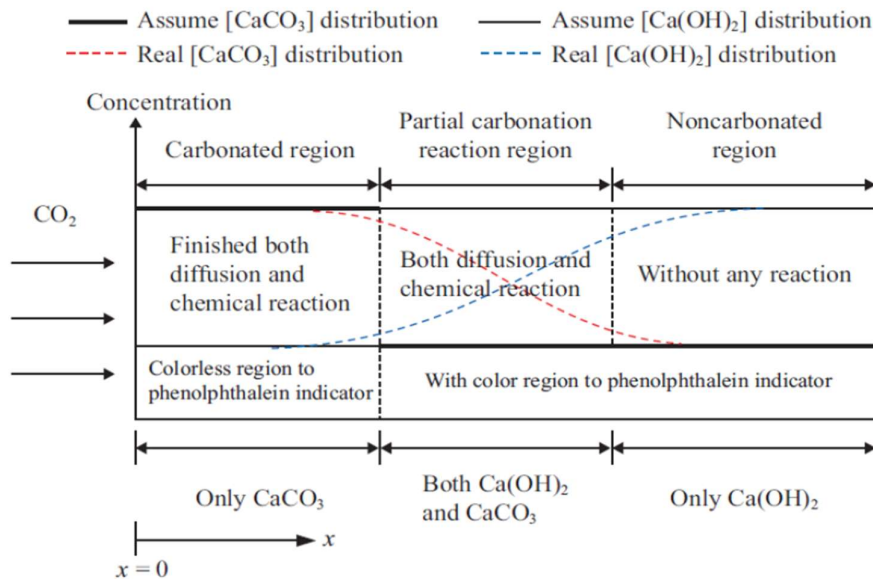


Figura 14 Diferenciación de las tres zonas durante el proceso de carbonatación (Liang, Huang, & Fang, Carbonation Service Life Prediction of Existing Concrete Viaduct/ Bridge Using Time-dependent Reliability Analysis, 2013)

De la figura anterior se puede interpretar que a medida que la profundidad del hormigón aumenta, la cantidad de CaCO_3 disminuye ya que esta tiene menos concentración de CO_2 . Y de manera inversa, a menor profundidad la cara exterior está sometida a una mayor concentración de CO_2 aumentando así la concentración de CaCO_3 .

Finalmente, cuando el frente carbonatado alcanza la posición de las armaduras y como consecuencia de la drástica reducción en el pH del hormigón se destruye la capa pasiva, se presenta la situación óptima para desencadenar la corrosión de las armaduras en las condiciones de aireación y humedad adecuadas.

A continuación, se muestra una figura donde se realiza la prueba de la fenolftaleína (sustancia que se torna rosada en las zonas no carbonatadas). En la primera etapa si bien hay zonas carbonatadas, el recubrimiento es suficiente para que este fenómeno no afecte a las armaduras, en la segunda etapa se produce la despasivación de las armaduras ya que la carbonatación no solo ha penetrado la capa superficial del hormigón y finalmente en la tercera etapa se desencadena la corrosión de las armaduras.

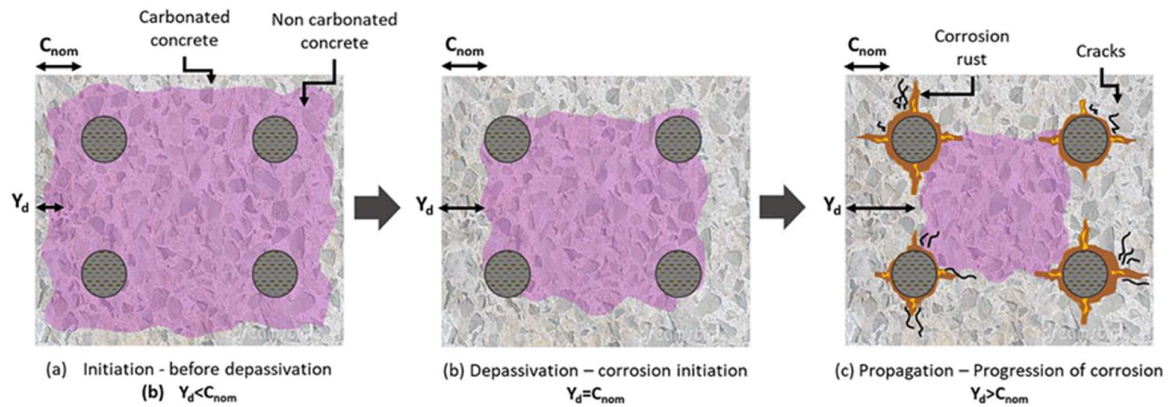


Figura 15 Etapas de la corrosión inducida por la carbonatación (Emerson, Lombardi, Lavinicki, & de Castro, 2024)

2.5.2. Ataque por cloruros

El ataque por cloruros es el mecanismo de deterioro de las armaduras de acero más agresivo y crítico para la durabilidad del hormigón armado en ambientes que cuentan con la presencia de una fuente de ion cloruro que pueda penetrar el hormigón y alcanzar la armadura. La particularidad de este mecanismo es su capacidad de crear una zona de corrosión localizada, incluso mientras la mayor parte del hormigón a su alrededor mantiene un pH elevado y el carácter protector de la capa pasiva.

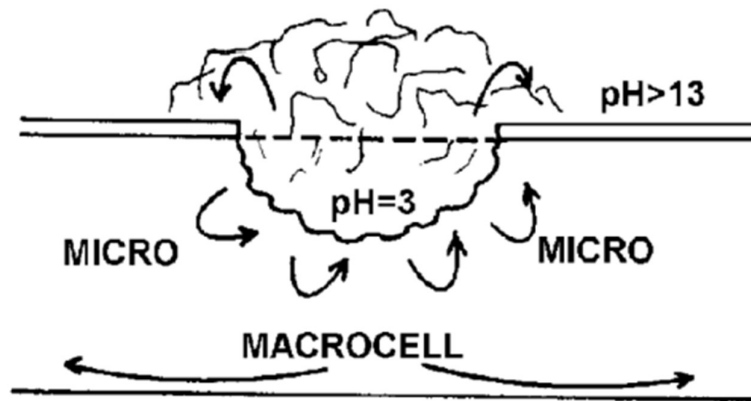


Figura 16 corrosión del acero embebido en hormigón por ataque de cloruros. (Rodríguez & Andrade, 2001)

De manera más detallada los iones cloruro penetran en la matriz de hormigón a través de sus poros y alcanzan la interfase acero-hormigón, provocando en esa zona la destrucción localizada de la capa pasiva. Esta vulnerabilidad en la matriz de hormigón puede deberse a una caída local del pH, una mala compactación del hormigón en la zona, o bien por una elevada fisuración del hormigón (Bermudez & Alaejos, 2007).

Después de generarse la destrucción localizada de la capa pasiva se generan pequeñas zonas anódicas que a su vez atraen más iones cloruro por la diferencia de potencial.

2.5.2.1 Fuentes y vías de penetración de cloruros

La penetración de los iones cloruro e incorporación de estos a la microestructura del hormigón se da mediante dos vías principales:

- **Cloruros externos (Penetración):**

Es la vía más común, donde los cloruros procedentes del ambiente exterior penetran a través de su red de poros. Algunas fuentes comunes son:

- Ambientes marinos: Especialmente en la zona de salpicadura y en ciudades costeras donde el propio aire marino contiene cloruros que se transportan kilómetros mar adentro.



Figura 17 Efectos de la corrosión por cloruros en ambiente marino. (Dirección General de Carreteras, 2012)

- Sales fundentes: Aplicación de cloruro de sodio o calcio en calzadas de puentes, viaductos, etc.



Figura 18 Efectos de la corrosión por cloruros en una pila con sales fundentes. (Dirección General de Carreteras, 2012)

- Ambientes urbanos e industriales: Industrias como la química y la papelera emiten compuestos clorurados.

- Suelos y aguas subterráneas: Hay diversas estructuras como las cimentaciones, túneles y muros que se sitúan en terrenos ganados del mar o regiones áridas donde el suelo cuenta con la presencia de estos iones.

- **Cloruros internos (Incorporación en mezcla):**

Ocurre cuando los cloruros están presentes en los componentes del hormigón. A pesar de que la normativa actual establezca unos límites, es muy común en estructuras antiguas debido al uso de aditivos acelerantes basados en cloruro de calcio o en ambientes marinos no lavados con concentraciones elevadas presentes en el agua.

Cuando se incorporan cloruros desde la fase de amasado del hormigón, existe el riesgo de que se produzca una rápida corrosión a edades tempranas, cuando este aún se encuentra en un estado plástico, con elevada humedad, y la alcalinidad aún no ha alcanzado la madurez. Una vez el hormigón comienza a endurecer, el pH de la mezcla se eleva, y la probabilidad de que se produzca corrosión es menor, esta última probabilidad será función del contenido de cloruros. (Vazquez Fernandez, 2020)

2.5.2.2 Contenidos máximos en cloruros

La normativa técnica establece límites estrictos al contenido total de cloruros soluble. Esta regulación está recogida en el Código Estructural.

Esta norma limita la presencia de iones cloruro expresándolos en un porcentaje de masa respecto del peso total del cemento (incluyendo las contribuciones de todos sus componentes: cemento, áridos, aditivos y agua).

Y en el artículo 33.1 añade: “En el caso de hormigones expuestos a ambientes XD o XS los valores anteriores se reducirán al 0.1% del peso de cemento para obras de hormigón pretensado y 0.2% para obras de hormigón armado.” (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Código Estructural, 2024)

2.6 Efecto conjunto: Carbonatación y ataque por cloruros

Es bastante frecuente que las estructuras presenten de manera simultánea o secuencial los dos mecanismos previamente descritos, generando un efecto sinérgico que acelera de manera más repentina la iniciación y propagación de la corrosión comparándola con el efecto de ambos mecanismos actuando por separado.

Al producirse la carbonatación se producen los siguientes fenómenos:

- Se reduce la cantidad de iones hidroxilo (OH^-). Así aumenta la relación entre la cantidad de iones cloruro y la de iones hidroxilo (los iones cloruro producen la corrosión cuando dicha relación supera el valor de 0.6 aproximadamente).
- Se liberan parte de los iones fijados química y físicamente. (Rodríguez Escribano, 2024)

En otras palabras, la carbonatación actúa como un mecanismo activador y potenciador del riesgo de cloruros, liberándolos de su estado fijo y concentrándolos en la zona donde la armadura se vuelve electroquímicamente activa.

2.7 Factores que aceleran la corrosión

Una vez iniciado el proceso de la corrosión, esta viene gobernada por una serie de factores interdependientes que hacen que la velocidad de la corrosión no sea un valor constante. Cada uno de los factores que se mencionan a continuación, si se comprenden y estudian, ayudan a predecir la vida residual de una estructura, priorizar las intervenciones y a saber cuáles son las técnicas de reparación más efectivas.

- **Contenido de humedad y saturación de los poros**

Como ya se trató en apartados anteriores, la humedad contenida en los poros del hormigón actúa como el electrolito (actor esencial en el proceso de la corrosión). Sin embargo, la presencia de humedad no es indicativa de que necesariamente se producirá corrosión en el hormigón armado ya que todo depende del porcentaje de humedad relativa presente.

Según distintas fuentes, su influencia es máxima en un rango de humedad relativa de entre el 70% y el 90% (Neville, Concrete Technology 2nd Edition, 2010). Por debajo del 70%, la escasez de agua dificulta la conducción iónica, ralentizando la corrosión y por encima del 90% de saturación, la difusión del oxígeno se ve severamente restringida, debiendo el oxígeno disolverse en el agua para llegar hasta la armadura (proceso que es muy lento).

- **Aireación diferencial**

Se produce cuando existe una diferencia en la concentración de oxígeno a lo largo de una misma barra de acero. Las zonas con menor concentración de oxígeno, por ejemplo, las que están bajo una fisura o tienen al lado un macroporo como consecuencia de una mala ejecución, se convierten en ánodos. Y por otro lado las zonas con mayor acceso al oxígeno se convierten en cátodos. Esta diferencia de potencial genera una corriente de corrosión que disuelve el metal en la zona anódica.

En la figura que se presenta a continuación se puede apreciar este fenómeno, donde se puede ver como una tubería pasa por terrenos con naturaleza diferencial, que si bien no es objeto de estudio, sirve para ilustrar este fenómeno.

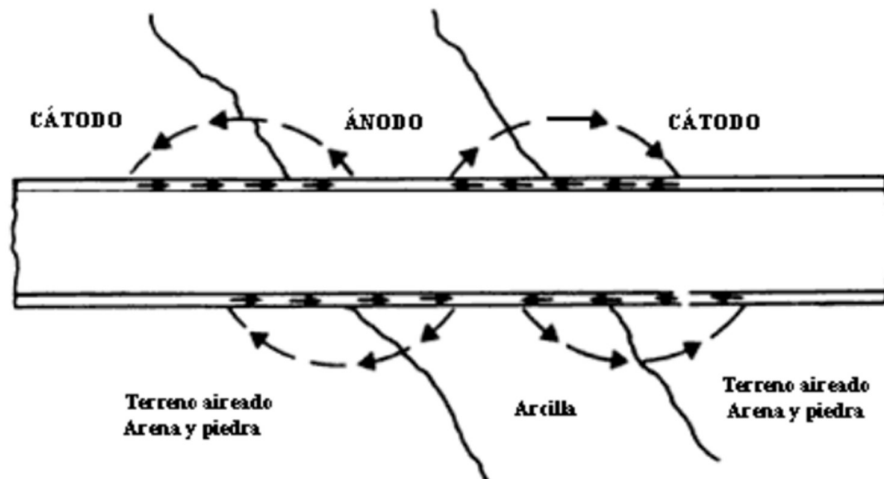


Figura 19 corrosión por aireación diferencial (Genesca, 1989)

- **Temperatura**

La temperatura juega un doble rol en este proceso, ya que un incremento de temperatura dentro de los rangos habituales de servicio aumenta de manera exponencial la velocidad de las reacciones electroquímicas y acelera los procesos de transporte de iones y de difusión de oxígeno. (Neville, Properties of concrete, 2011). Por otro lado, en climas fríos una baja temperatura facilita la condensación y los ciclos de hielo-deshielo generan una micro fisuración en el hormigón, creando nuevas vías para la entrada de agentes agresivos y deteriorando así la protección del recubrimiento.

- **Macropares galvánicos**

Se trata de pilas de corrosión que se generan entre dos áreas de la misma armadura (o entre armaduras conectadas) distanciadas un máximo de algunos decímetros.

En este fenómeno un área ya despasivada y con corrosión activa (por ejemplo, un ataque por cloruros) actúa como ánodo. Mientras que otra área cercana, que aún mantiene su estado pasivo debido a la protección del hormigón, actúa como cátodo. La conexión eléctrica a través del metal y la conexión iónica a través del electrolito, permiten que se cree una celda galvánica de largo alcance. Donde por un lado la gran superficie catódica demanda una gran cantidad de electrones y por otro lado la pequeña superficie anódica recibe toda esa demanda aumentando de manera drástica la velocidad de corrosión.

En otras palabras, a la corrosión inicial de la micropila en el ánodo, se le suma la acción impulsora de la macropila.

- **Composición y dosificación de los distintos componentes del hormigón**

Como ya se vio en apartados anteriores, la calidad del hormigón es la primera barrera de defensa frente a la corrosión y si bien hay un sinnúmero de factores que le influyen los más relevantes son:

Alta relación Agua/Cemento: Aumenta la porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración de agentes agresivos y reduciendo la resistividad.

Recubrimiento inadecuado: Reduce el tiempo de iniciación y facilita el acceso de oxígeno y humedad a la armadura.

Tipo de cemento: Los cementos con adiciones puzolánicas o siderúrgicas producen un hormigón más denso y de menor permeabilidad, lo que ralentiza la corrosión.

2.8 Efectos de la corrosión sobre estructuras

Habiendo hablado de la iniciación del proceso de la corrosión y de los factores que aceleran y favorecen este fenómeno. Podemos entrar a ver cuáles son los efectos de este fenómeno sobre las estructuras de hormigón.

Estos efectos se manifiestan a diferentes escalas, desde la micro-fisuración del recubrimiento hasta el colapso estructural, comprometiendo así la seguridad y funcionalidad de la estructura.

2.8.1 Fisuración y desprendimiento del recubrimiento

El efecto más visible y característico de la corrosión es la fisuración del hormigón de recubrimiento. Este fenómeno se produce ya que los productos de la corrosión (óxidos e hidróxidos de hierro) tiene un volumen superior al del acero original, entre 2 y 6 veces mayor (Neville, Properties of concrete, 2011).

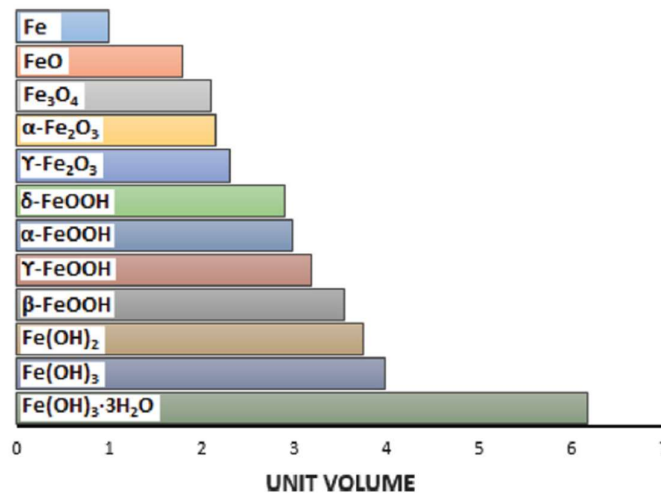


Figura 20 Volumen relativo que ocupa el hierro en comparación con los volúmenes de sus distintos productos de corrosión u óxidos (ACI 222R-19, 2019)

Estos productos de la corrosión inicialmente provocan micro fisuras internas en la interfaz acero-hormigón. Y a medida que la corrosión progresa las fisuras se propagan y coalescen hasta alcanzar la superficie exterior, manifestándose como fisuras longitudinales paralelas a la dirección de la armadura.

Finalmente, la presión interna supera la resistencia a tracción del hormigón lo que lleva al descascarillamiento y desprendimiento del recubrimiento. (Rodríguez, Ortega, & Casal, Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement, 1997) Este proceso no solo tiene un impacto estético, sino que está eliminando la protección que tenía previamente la armadura frente a la intemperie, exponiéndola a agentes externos y acelerando aún más el proceso de la corrosión.

A continuación, se muestran los diferentes estados de fisuración del recubrimiento, si bien se muestra la fisuración en un elemento pretensado, sirve como ilustración para ver cómo el recubrimiento se va fisurando conforme el proceso de la corrosión va evolucionando.

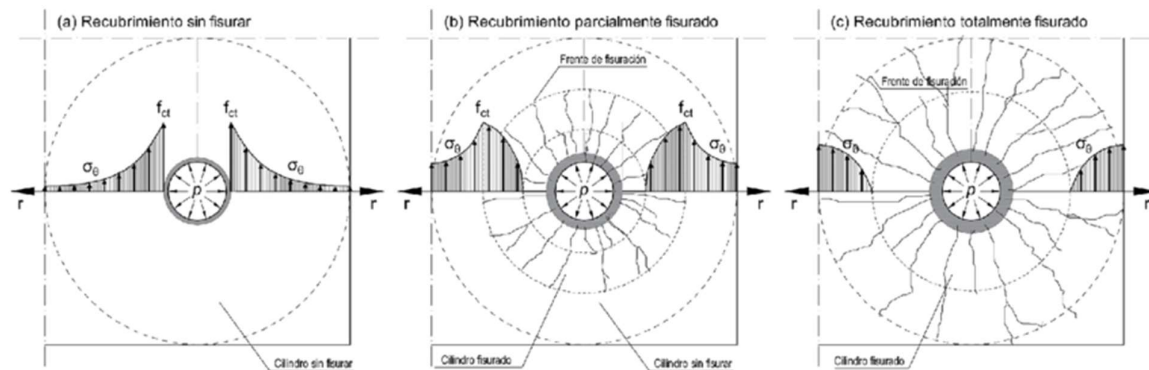


Figura 21 Diferentes estados de fisuración del recubrimiento (Rodríguez, Anaya, Andrade, & Martín, 2020)

2.8.2 Pérdida de sección eficaz del acero

A lo largo del proceso de la corrosión, la transformación del hierro metálico en óxidos implica una pérdida directa de material. Ya que la corrosión generalizada reduce de manera uniforme el diámetro de la barra, mientras que la corrosión localizada por picaduras genera oquedades profundas que actúan como focos de concentración de tensiones.

Esta pérdida de sección transversal (tanto para la corrosión generalizada como localizada), tiene consecuencias directas sobre la capacidad resistente del elemento reduciendo la capacidad a tracción y compresión ya que estas son directamente proporcionales al tamaño de la sección del acero y sobre la capacidad a flexión y cortante ya que la pérdida de sección debilita la armadura longitudinal.

En base a la pérdida de sección que tienen las armaduras es importante puntualizar que las armaduras tanto menor diámetro tienen son más sensibles a este fenómeno. Ya que para una misma pérdida de sección de la barra cuanto menos diámetro tenga esta, supondrá mayor proporción de pérdida de sección de esta.

Es crucial destacar que, en la pérdida de sección localizada la pérdida de ductilidad y la posibilidad de una falla frágil son aún mayores y más críticas por la mera razón de la concentración de tensiones previamente descrita en el fondo de las picaduras.

2.8.3 Pérdida de adherencia acero-hormigón

La adherencia es el mecanismo fundamental que permite la perfecta sinergia y unión entre el acero y el hormigón y la corrosión deteriora esta unión a través de los siguientes fenómenos (ACI 222R-19, 2019):

- **Fisuración del recubrimiento:** Como ya se mencionó en el apartado 2.7.1 las fisuras longitudinales inducidas por la corrosión rompen la confinación del hormigón, reduciendo significativamente la contribución por confinamiento a la adherencia.
- **Deterioro de las corrugas:** La corrosión reduce y redondea las corrugas de las barras de acero corrugadas usadas para el armado del elemento, estas son esenciales para el engranamiento mecánico entre el acero y el hormigón. Una barra lisa ofrece una adherencia sustancialmente menor que una barra corrugada.
Es importante puntualizar que numerosas investigaciones han demostrado que la corrosión ataca preferentemente a las aristas vivas de las corrugas. Lo que conduce a un “redondeo” progresivo de la geometría de la barra y como la capacidad de la barra para transferir tensiones al hormigón depende de la relación entre la altura de la corruga y su espaciamiento este fenómeno reduce de manera crítica esta relación, degradando así la eficiencia del anclaje. (fib commission 4, 2014)
- **Presencia de productos de corrosión:** La capa de óxidos que crece alrededor de la barra se interpone entre esta y el hormigón actuando como una especie de “lubricante” que reduce el coeficiente de fricción.

2.8.4 Reducción de la sección resistente de hormigón

El descascarillamiento del elemento supone una pérdida de sección resistente que en numerosas ocasiones supone una consecuencia no despreciable. En los elementos esbeltos como vigas o pilares, la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento suponen una pérdida efectiva de la sección transversal del hormigón que resiste los esfuerzos de compresión y cortante. En el caso de la siguiente figura se puede ver una viga donde la pérdida de sección no es un factor despreciable.



Figura 22 Corrosión severa en vigas con pérdida de recubrimiento (Peiren, 2007)

2.9. Modelos de evolución temporal de la corrosión

La capacidad de modelar la evolución temporal del deterioro abre un abanico de posibilidades en distintos ámbitos, se puede predecir la vida útil de una estructura, diseñar nuevas estructuras duraderas, así como evaluar, priorizar y planificar el mantenimiento de las existentes.

Y dentro del ámbito de estudio objeto de este trabajo, estos modelos constituyen un pilar fundamental para la valoración de las consecuencias del retraso en la intervención de una estructura cuando esta presenta corrosión. Ya que con los modelos de evolución temporal de la corrosión podemos predecir el estado de la estructura a través del tiempo y cuantificar estas consecuencias.

2.9.1 Las dos fases de Tuutti

El punto de partida de todos los modelos que se han ido desarrollando a través del tiempo es el modelo conceptual propuesto por Tuutti en 1982 en su libro “Corrosion of Steel in concrete” que divide la vida útil de la estructura en dos fases claramente diferenciadas:

- **Fase de iniciación (t_0):** Periodo durante el cual los agentes agresivos como los cloruros y el dióxido de carbono penetran a través del recubrimiento de hormigón hasta alcanzar la armadura y despasivarla. En esta etapa no hay un daño estructural apreciable y la duración de esta etapa depende de manera directa de la calidad del hormigón, el espesor del recubrimiento y la agresividad del ambiente.
- **Fase de propagación (t_p):** Periodo en el que comienza la despasivación de la armadura, durante el cual la corrosión avanza llevando a una pérdida de sección del acero, fisuración del hormigón y finalmente la pérdida de funcionalidad y seguridad del elemento.

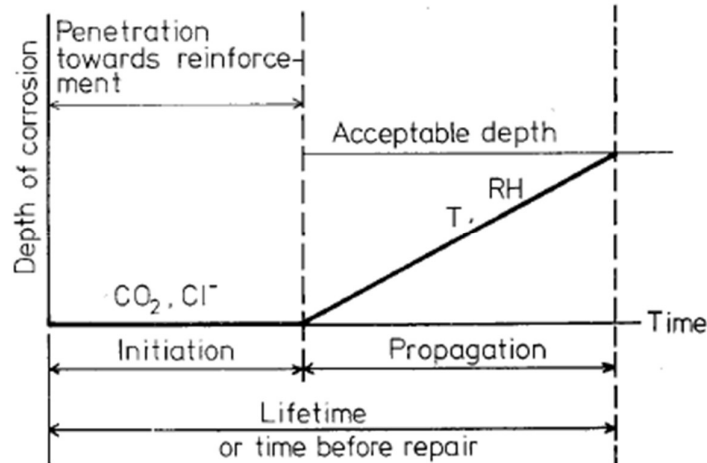


Figura 23 Esquema de la secuencia de corrosión del acero en concreto (Tuutti, 1982)

La suma temporal de ambas fases da como resultado la vida útil de la estructura, alcanzando el estado límite predefinido como:

$$t = t_0 + t_p$$

En este periodo de tiempo la estructura es capaz de cumplir con los requisitos de seguridad, estabilidad y utilidad, sin requerir costes extraordinarios en reparaciones para darle un buen mantenimiento. (Ranjith, Balaji Raio, & Manjunath, 2016)

Aparte del modelo propuesto por Tuutti que fue uno de los pioneros, a través del tiempo se realizaron otros estudios y modelos que también son capaces de predecir la vida útil de las estructuras.

A continuación, se recopilan los más destacados:

- **Vu & Stewart (2005):** Establece una relación cuantitativa entre la pérdida de sección de las armaduras por corrosión y la abertura de las fisuras en el hormigón. Mediante esta correlación se puede conectar el deterioro físico con los umbrales de daño específicos que determinan distintos niveles y costes de reparación. Su principal innovación es integrar este modelo mecánico dentro de un análisis de coste de ciclo de vida, proporcionando una herramienta para optimizar el momento de intervención basándose en criterios económicos y técnicos. (Vu & Stewart, 2005)
- **Song et al. (2007):** Introduce una cuarta etapa crítica de aceleración entre la propagación y el deterioro final, donde la fisuración generada aumenta drásticamente la penetración de cloruros y humedad. Esta etapa se caracteriza por que se acelera de manera exponencial la corrosión y al tomar en cuenta esta etapa y cuantificarla permite una predicción de vida útil más realista para estructuras en ambientes agresivos. (Song, Kim, Saraswathy, & Kim, 2007)

- **Bastidas – Arteaga et al. (2008):** Introduce un enfoque probabilístico donde la fisuración generada por los productos de corrosión en la etapa de propagación aumenta de manera directa la difusión de los cloruros, creando un bucle que se retroalimenta y que acelera el deterioro. Su principal diferencia respecto a otros modelos secuenciales simples es la integración de daño mecánico y transporte iónico que básicamente proporciona una retroalimentación y auto aceleración del proceso. (Bastidas-Arteaga, Sanchez - Silva, Chateauneuf, & Silva, 2008)
- **Liang et al. (2009):** Se distingue por utilizar una modelización numérica avanzada para predecir el transporte de cloruros, superando así las simplificaciones de la solución empleada mediante la Ley de Fick (ley que se verá más adelante). Su enfoque considera condiciones realistas como ciclos de humedad-secado y la dependencia de parámetros con la temperatura, permitiendo una simulación más precisa durante la fase de iniciación. (Liang, Huang, & Yeh, Service Life Prediction of Pier for the Existing Reinforced Concrete Bridges in Chloride-Laden Environment, 2009)
- **Andrade & D'Andrea (2010):** Este modelo representa un enfoque práctico y empírico para cuantificar la fase de propagación de la corrosión. Su premisa fundamental es la existencia de una relación inversa y predecible entre la resistividad eléctrica del hormigón y la velocidad de corrosión de las armaduras embebidas. (Andrade & D'Andrea, Electrical Resistivity as Microstructural Parameter for the Modeling of Service Life of Reinforced Concrete Structures, 2010)
- **Balafas & Burhoyne (2011):** Este modelo prioriza la corrosión por cloruros ya que establece que este proceso es el que domina la vida útil de la estructura. (Balafas & Burgoyne, 2011)
- **Pan & Wang (2011):** Se distingue por ser un marco probabilístico que permite evaluar la vida útil considerando la acción simultánea de múltiples agentes de deterioro y la incertidumbre en los parámetros comúnmente usados en este tipo de modelos. A diferencia de otros modelos deterministas, tiene un enfoque que cuantifica el riesgo de fallo a lo largo del tiempo, proporcionando una base más robusta para la toma de decisiones. (Pan & Wang, 2011)

2.9.2 Modelado de la Fase de iniciación (t_0): La penetración de cloruros

2.9.2.1 La Ley de Fick y los Modelos Fickianos

El modelo normativo para cuantificar la penetración de los cloruros es la Segunda Ley de Fick, la cual describe un mecanismo de difusión no estacionario (la difusión varía en el tiempo y se va acumulando) a través de un medio supuestamente homogéneo (aunque sabemos que el hormigón no lo es):

$$C(x, t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right]$$

Donde:

- $C(x,t)$ es la concentración de cloruros a una profundidad x y un tiempo t (%)
- C_s es la concentración de cloruros en la superficie del hormigón (%)
- D_c es el coeficiente de difusión aparente de cloruros (m^2/s)
- Función error de Gauss

El tiempo de iniciación (t_0) se calcula despejando t de la ecuación anterior cuando la concentración de los cloruros en la profundidad de la armadura ($x = d$, siendo d el recubrimiento) iguala a la concentración umbral crítica (C_{th}):

$$t_0 = \frac{d^2}{4 \cdot D_c \cdot \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_s} \right) \right]^2}$$

Como se puede ver el modelo fickiano es una herramienta analítica poderosa. Sin embargo, presenta una serie de limitaciones al no considerar la unión física y química de los cloruros a la pasta de hormigón, la dependencia del coeficiente de difusión y la concentración de cloruros a través del tiempo, al considerar un medio homogéneo cuando el hormigón no lo es y al no tener en cuenta los ciclos de humedad y secado del hormigón.

Por lo anteriormente mencionado, aunque la segunda ley de Fick se aplique usualmente para caracterizar el periodo de iniciación de la corrosión, hay aspectos a tener en cuenta que pueden hacer que el periodo final este sobreestimado o subestimado. A raíz de esto también han surgido modelos más avanzados que incorporan estas no linealidades, permitiendo predicciones más realistas.

2.9.2.2 Modelado de la fase de iniciación según el Código Estructural

La normativa vigente que interpreta y aplica la fase de iniciación en España es el Código Estructural, que en el apartado 3 del Anejo 12 que habla de la vida útil de los elementos de hormigón habla de los modelos para el periodo de iniciación en elementos de hormigón (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021).

Donde en el caso de la carbonatación del hormigón para elementos ubicados en clases de exposición XC se tiene que:

$$t_{inic} = t_{inic,desp}$$

Siendo $t_{inic,desp}$ el periodo de tiempo transcurrido hasta que se inicia la corrosión, que viene definido por:

$$t_{inic,desp} = \left(\frac{c}{k_{ap,carb}} \right)^2$$

Donde:

- c es el recubrimiento mínimo en mm.
- $k_{ap,carb}$ es el coeficiente de carbonatación aparente, expresado en mm/año

Este coeficiente, a falta de datos experimentales puede ser considerado por el autor del proyecto a partir de la siguiente expresión:

$$k_{ap,carb} = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a(f_{ck} + 8)^b$$

Siendo:

- c_{env} y c_{air} los coeficientes de ambiente y de utilización aireantes que se obtendrán respectivamente de acuerdo con las tablas A12.3.1.a Y A12.3.1.b
- f_{ck} es la resistencia característica especificada para el hormigón en N/mm²
- a, b son los parámetros adimensionales, referidos a la tabla A12.3.1.c

Ambiente	C_{env}
Protegido de la lluvia	1,0
Expuesto a la lluvia	0,5
Elementos enterrados, por encima del nivel freático	0,3
Elementos enterrados, por debajo del nivel freático	0,2

Tabla 1 Para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Aire ocluido	C_{air}
< 4,5 %	1,0
\geq 4,5 %	0,7

Tabla 2 para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Conglomerante	a	b
Cemento portland	1800	-1,7
Cemento portland + 28% cenizas volantes	360	-1,2
Cemento portland + 9% humo de sílice	400	-1,2

Tabla 3 Parámetros a y b para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Por otro lado, para el ingreso de los iones cloruro en el hormigón en elementos ubicados en clases de exposición XS o XD, a los efectos de la determinación del avance de los iones cloruro en el interior del hormigón en función al tiempo el autor del proyecto puede utilizar la siguiente expresión:

$$C_{th} = C_b + (C_s - C_b) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_{app,C}(t) \cdot t}} \right) \right]$$

Donde:

- C_{th} es el contenido límite de iones cloruro en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión
- C_b es el contenido de cloruros aportados por los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, expresados en porcentaje respecto al peso de cemento, de acuerdo con:

$$C_b = \sum_{i=1}^n C_{b,i}$$

Siendo $C_{b,i}$ los contenidos de iones cloruros de cada uno de los materiales componentes (cementos, áridos, adiciones, aditivos, etc.)

- C_s contenido de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en porcentaje del peso de cemento. A falta de información específica adicional que puede obtenerse de la tabla A12.3.2.a
- C es el recubrimiento expresado en mm.
- t es el tiempo transcurrido hasta que se inicia la corrosión en años.
- $D_{app,C}(t)$ coeficiente de difusión de cloruros aparente, expresado en $\text{mm}^2/\text{año}$, a la edad de t , obtenido experimentalmente del siguiente modo:
 - a) En estructuras existentes, a partir de determinaciones experimentales del contenido de cloruros a distintas profundidades sobre testigos extraídos del elemento estructural.
 - b) En fase de diseño para hormigones en clase de exposición XS3 de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{app,C}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

Siendo $D_{app,C}(t_0)$ el coeficiente de difusión de cloruros aparente a la edad $t_0 = 28$ días (en años), cuya determinación se debe realizar a partir de ensayos específicos de difusión de cloruros, según la norma UNE-EN 12390-11.

A efectos orientativos y de evaluación meramente preliminar, se incluyen en la tabla A12.3.2.b los valores de $D_{app,C}(t_0)$ obtenidos a partir del ensayo definido en la norma NT BUILD 492.

- n es el coeficiente de envejecimiento que, a falta de valores experimentales, puede obtenerse de la tabla A 12.3.2.c, para las clases de exposición XS2 y XS3.
- k_e coeficiente que depende de la temperatura media ambiental, T_{real} , expresada en $^{\circ}\text{C}$ de acuerdo con la siguiente expresión:

$$k_e = e^{4800 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{real}} \right)}$$

Clases de exposición	Distancia L respecto a la costa (m)	C_s (% sobre peso de hormigón)
XS1	Zona de spray, próxima a la zona de salpicaduras	0,25
	Resto hasta $L \leq 5000$	0,15
XS2	n/a	0,40
XS3	n/a	0,50
XD1, XD2, XD3	n/a	0,40

Tabla 4 Estimación del contenido de cloruros en la superficie de hormigón (Comisión Permanente del Hormigón & Comisión Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Valores de $D_{app,c}(t_0)$ [10^{-12} (m ² /s)]				
Tipo de conglomerante	relación $(a/c)_{eq}^{(*)}$			
	0,35	0,40	0,45	0,50
CEM I	-	8,9	10,0	15,8
CEM II/B-V, CEM I con adición de más del 22% de cenizas volantes	-	5,6	6,9	9,0
CEM I con adición de humo de sílice por encima del 5%	4,4	4,8	-	-
CEM III/B	-	1,4	1,9	2,8

Tabla 5 Valores indicativos del coeficiente de difusión de cloruros aparente obtenidos con la norma NT BUILD 492 (Comisión Permanente del Hormigón & Comisión Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Relación a/c	Tipo de cemento	Coefficiente de envejecimiento, α
Entre 0,40 y 0,50	CEM I	0,30
Otros casos		0,50

Tabla 6 Coeficiente de envejecimiento (Comisión Permanente del Hormigón & Comisión Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Finalmente, el código también establece el contenido límite de iones cloruro en el hormigón C_{th} que provoca el inicio de la corrosión en la armadura y proporciona la tabla A12.3.2.1.a donde este límite está en función de la clase de exposición referido al contenido de cemento:

Clase de exposición	C_{th} [% sobre peso de cemento]
XS1	0,60
XS2	0,80
XS3	0,60
XD1	0,60
XD2	0,60
XD3	0,40

Tabla 7 Contenido límite de ion cloruro C_{th} (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

2.9.2.3 Naturaleza oculta del proceso de iniciación (t_0)

Como se mencionó de manera inicial y se pudo ver a lo largo de los apartados previos. El periodo de iniciación es un proceso químico y electroquímico que ocurre a nivel microscópico dentro de la matriz del hormigón.

Donde por un lado se produce la penetración de agentes agresivos como iones cloruro y dióxido de carbono a través de los poros de hormigón y la despasivación de la capa pasiva cuando estos agentes alcanzan la armadura. Pero por otro lado estos efectos no tienen manifestaciones externas visibles, no provocan pérdida de sección del acero, no provocan fisuras, ni abombamientos ni desprendimientos del hormigón.

Debido a esta ausencia de efectos externos, en inspecciones visuales que son la base de los programas de mantenimiento (y que se centran en detectar daños evidentes), no se puede detectar el periodo de iniciación.

2.9.3 Modelado de la Fase de propagación (t_p): La penetración de cloruros

Después de la fase de iniciación definida en el apartado anterior viene la segunda fase, la fase de propagación, dicha fase se caracteriza por la evolución del daño una vez la armadura ha sido despasivada. Para cuantificar la progresión de este daño, es esencial poder predecir la velocidad de la corrosión.

Dado que la medición directa in-situ no es siempre viable, se han desarrollado modelos empíricos que permiten estimar la velocidad de corrosión en función de parámetros ambientales y de composición del hormigón que son más fáciles de determinar. A continuación, se describen distintos modelos que han evolucionado a través del tiempo, cada

uno con distintos matices y características que permiten estimar en distintas situaciones de manera más o menos fidedigna la velocidad de corrosión:

- **Morinaga (1988):** Este modelo es un hito fundamental ya que es el primer modelo integral para predecir la velocidad de corrosión durante la propagación. Este modelo establece correlaciones experimentales directas entre la velocidad de corrosión y parámetros ambientales como ser el contenido de cloruros en la armadura y la temperatura (Morinaga, 1988).
- **Modelo de Liu & Weyers (1998):** Este modelo es pionero en cuantificar el tiempo hasta la fisuración durante la propagación e integra por primera vez de forma explícita el efecto crítico de la humedad relativa en la interfaz acero-hormigón. Establece que el umbral de la humedad relativa para sostener la corrosión depende directamente del contenido de cloruros, diferenciándose así de modelos anteriores como el de Morinaga y proporcionando un mecanismo más realista para predecir el inicio del daño visible (Liu & Weyers, 1998).
- **Modelo de Vu & Stewart (2000):** Se distingue por su enfoque en la evaluación estructural y la confiabilidad, simplificando la predicción de la velocidad de corrosión durante la propagación a dos parámetros clave de diseño: la relación agua/cemento y el recubrimiento. De esta manera ignora variables dinámicas como la humedad relativa y la temperatura, haciéndola ideal para análisis probabilísticos y de sensibilidad a nivel estructural (Vu & Stewart, 2005).
- **Modelo de Li (2004a):** Este modelo representa un enfoque puramente fenomenológico para la fase de propagación, donde la velocidad de corrosión disminuye algorítmicamente con el tiempo de propagación. Básicamente, prescinde de parámetros ambientales explícitos, pero a la vez captura de manera implícita su efecto combinado a través de una variable temporal. Ofrece una herramienta práctica cuando solo se conoce el tiempo transcurrido desde la despasivación, aunque tiene menor fundamento fisicoquímico (Li, 2004).
- **Modelo de Li (2004b):** Constituye una evolución significativa respecto al modelo anterior (2004a), pasando de un enfoque puramente temporal a uno multiparamétrico explícito. Su esencia radica en cuantificar la velocidad de corrosión durante la propagación mediante una ley potencial que integra factores clave como la humedad relativa, temperatura, relación agua/cemento, recubrimiento y contenido de cloruros (Li, 2004).
- **Modelo de Kong et al. (2006):** Este modelo refina el ya comentado modelo de Liu & Weyers (1998), ya que incorpora de manera directa la relación agua/cemento como parámetro fundamental, influyendo así de manera directa en la resistividad del hormigón y la concentración de iones cloruro. Al mantener la complejidad paramétrica del modelo anteriormente mencionado y añadiendo la relación agua/cemento, lo que

hace es ofrecer una representación más realista de como la microestructura del hormigón modula la cinética de la corrosión una vez este fenómeno inicia (Kong, Ababneh, Frangopol, & Xi, 2002).

- **New Empirical Model (2019):** Este modelo representa un esfuerzo por crear un modelo unificado que integra la influencia de la composición mineralógica del cemento a través de su efecto de la resistividad. Sin embargo, su complejidad operativa es a su vez su mayor limitación, ya que la dificultad para caracterizar de manera experimental dichos parámetros microestructurales hace que su aplicación sea poco practica en la evaluación rutinaria de las estructuras, donde modelos con parámetros más accesibles suelen ser de preferencia (Lu, y otros, 2019).

2.9.3.1 Criterios de selección y modelo adoptado

En el caso de la fase de propagación es conveniente seleccionar un modelo para predecir la corrosión en esta segunda fase ya que, en la fase de propagación a diferencia de la fase de iniciación, si se generan manifestaciones físicas claramente visibles en una inspección. El daño se hace visible debido a la expansión volumétrica de los productos de corrosión y síntomas de la corrosión como la fisuración longitudinal, las manchas de oxido y la perdida de la sección del acero si son detectables.

Es por eso, que habiendo visto los modelos más relevantes de las últimas décadas es conveniente escoger uno para usarlo como base en las estructuras que más adelante serán objeto de estudio.

Para la selección del modelo se toma como base y referencia principal un Trabajo de Fin de Máster realizado por Kerman Vázquez, que se enfoca y dedica en su totalidad a analizar la eficacia de cada uno de estos modelos en una muestra de 32 estructuras seleccionadas de hormigón armado y pretensado (puentes, viaductos, muelles y pantalanés).

En este trabajo se corren simulaciones de cada uno de los modelos en cada una de las 32 estructuras para saber cuál de estos representa de manera más precisa la velocidad de corrosión. En este proceso se compara la perdida de diámetro real que presentan las estructuras vs. la perdida de diámetro teórica que viene determinada por el modelo y se califica como resultado favorable cuando la perdida de sección obtenida del modelo es superior a la real, indicando que el margen de seguridad es como mínimo igual o mayor respecto a la realidad y se califica como desfavorable al modelo cuyos resultados den un valor inferior al obtenido en la realidad, significando que el margen de seguridad es inferior.

Después de este análisis, se concluye que el modelo de Li (2004a) es “sin lugar a duda, además de ser el más sencillo para su aplicación en casos reales, también es el que mejores resultados ha dado, puesto que, de los 32 casos estudiados (5 de hormigón pretensado y 27 de hormigón armado), 26 de ellos son favorables (resultados del modelo por encima del resultado real), y únicamente 6 de ellos son desfavorables (resultados del modelo por debajo del resultado real), aunque con valores muy próximos a los reales” (Vazquez Fernandez, 2020).

El modelo de Li (2004a), como ya se ha mencionado se trata de un modelo sencillo en el que la velocidad de corrosión es función del tiempo de duración de la fase activa de la corrosión, es decir, el tiempo de propagación. Dicha formula está definida como:

$$i_{corr} = 0.3683 * \ln(t_p) + 1.1305$$

Donde:

i_{corr} es la velocidad de corrosión en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

t_p es el periodo de propagación de la corrosión medido en años

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos de las simulaciones con cada uno de estos modelos, donde el número de casos favorables para el modelo de Li (2004a) es de 26 de los 32 que hay en total:

Modelos de velocidad de corrosión	Número de casos:	Número de casos:	Margen de seguridad:	Margen de seguridad:
	$\Delta\phi_M > \Delta\phi_R$	$\Delta\phi_M < \Delta\phi_R$	$\Delta\phi_M > \Delta\phi_R$	$\Delta\phi_M < \Delta\phi_R$
Liu & Weyers (1998)	4 (12.5%)	28 (87.5%)	1.71	0.33
Kong et al. (2006)	1 (3%)	31 (97%)	1.01	0.12
Vu & Stewart (2000)	18 (56.2%)	14 (43.8%)	2.29	0.51
Li (2004a)	26 (81.2%)	6 (18.7%)	1.98	0.81
Li (2004b)	11 (34.3%)	21 (65.7)	1.51	0.45
<i>New Empirical Model (2019)</i>	7 (21.8%)	25 (78.2%)	1.54	0.43

Figura 24 Resumen de los resultados obtenidos para los 32 casos de estudio (Vazquez Fernandez, 2020)

2.9.3.2 Modelado de la fase de propagación según el Código Estructural

La interpretación que tiene la normativa vigente en España respecto a esta segunda etapa en el fenómeno de la corrosión es entenderlo como una fase en la que la corrosión ya se ha iniciado y se modela el tiempo hasta que parecen daños visibles o críticos (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021):

Fisuración del recubrimiento: Que es el tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión hasta la fisuración del recubrimiento y se puede obtener mediante el uso de la siguiente expresión:

$$t_{fis,corr} = \frac{P_{corr}}{v_{corr}} = \frac{80 \cdot c}{\phi \cdot v_{corr}}$$

Donde:

- $T_{fis,corr}$ es el tiempo desde el inicio de la corrosión hasta la fisuración del recubrimiento en años
- P_{corr} es la penetración límite medido en micras
- C es el espesor de recubrimiento del hormigón en mm
- ϕ es el diámetro de la armadura en mm
- V_{corr} es la velocidad de corrosión, expresado en micras al año de acuerdo con la tabla A12.4.1

Clase de exposición			v_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
Ambiente normal	Seco o permanentemente húmedo	XC1	1
	Humedad alta	XC2	4
	Humedad moderada	XC3	2
	Ciclos humedad – secado	XC4	5
Ambiente marino	Expuesto a aerosoles marinos	XS1	20
	Sumergido permanentemente	XS2	4
	Zona de mareas o salpicaduras	XS3	50
Ambiente con sales fundentes	Humedad moderada	XD1	35
	Humedad alta	XD2	20
	Ciclos humedad - secado	XD3	35

Tabla 8 Velocidad de corrosión (Comisión Permanente del Hormigón & Comisión Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

Perdida de sección inadmisibles de la armadura: El tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión hasta la pérdida de sección de la armadura definida por un espesor $\Delta\phi$, se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{secc,corr} = \frac{\Delta\phi_{lim}}{v_{corr}}$$

Donde:

- $t_{secc,corr}$ es el tiempo desde el inicio de la corrosión hasta la pérdida de diámetro definido como inadmisibles en la armadura en años
- $\Delta\phi_{lim}$ es la variación de diámetro debido a la corrosión de la armadura, que se considera inadmisibles expresada en micras
- V_{corr} es la velocidad de corrosión expresada en micras al año de acuerdo con la tabla A12.4.1

2.9.3.3 Velocidad de corrosión y penetración del ataque

Uno de los enfoques más extendidos para la caracterización de la corrosión de armaduras en estructuras de hormigón es el siguiente:

$$P_{av} = 0.0116 * i_{corr}$$

Esta ecuación establece una relación directa entre la densidad de corriente de corrosión y la velocidad de penetración del ataque en el acero (Feliu & Andrade, 1989).

Donde P_{av} es la penetración media del ataque por corrosión expresado en mm/año y por otro lado i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión en $\mu A/cm^2$. Esta relación, ampliamente aceptada en la literatura técnica y normativa permite traducir una magnitud electroquímica en una variable geométrica directamente interpretable en términos de pérdida de material, facilitando su uso en evaluaciones de durabilidad y en modelos simplificados de evolución de daño.

En línea con lo tratado y en aquellos casos en los que el ataque se haya producido por efecto de los cloruros, resulta necesario multiplicar el resultado por un factor alfa (α) que relaciona la profundidad media de las picaduras y el espesor promedio perdido por corrosión generalizada (Fernandez, Verdeja, & Perosanz, 2011).

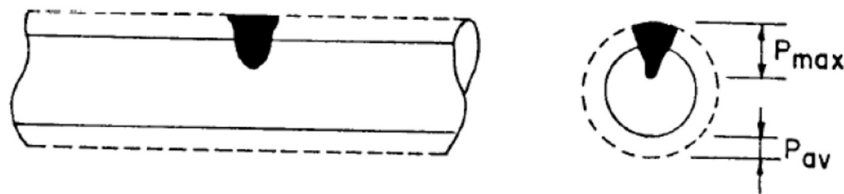


Figura 25 Corrosión homogénea (P_{av}) y máxima profundidad de ataque (P_{max}) (Rodríguez & Andrade, 2001)

Sin embargo, si bien este es un factor determinante se debe tomar en cuenta que es un factor difícil de determinar, distintos autores apoyados en experiencias reales coinciden en situar este factor en un rango comprendido entre 4 y 8 (Zhang, Zeng, & Fang, 2019).

2.10. Técnicas de reparación y protección

Cuando se habla de las técnicas de reparación y protección de elementos estructurales frente a la acción de la corrosión se está tocando un tema ampliamente estudiado a través del tiempo. Ya que al ser la corrosión una patología presente en la mayoría de las estructuras y que se ha manifestado desde que se comenzó a construir con hormigón armado, varios investigadores e ingenieros han propuesto distintas formas de reparar y proteger estos elementos frente a esta patología.

La elección de la técnica de reparación y protección depende de varios factores. Principalmente del tipo de elemento estructural y las fuerzas a las que está sometido, pero por sobre todo de la etapa de deterioro en la que se encuentra (desde la iniciación del fenómeno hasta un daño estructural avanzado) y de la extensión del daño (localizado o generalizado).

En los siguientes apartados se presentan las técnicas más utilizadas en la práctica actual para hacer frente a la corrosión.

2.10.1 Técnicas de reparación y protección para daños iniciales o localizados

Estas actuaciones se enfocan en detener y controlar el proceso de la corrosión, reparando a su paso daños físicos menores. En base a esto se pueden clasificar como actuaciones de “durabilidad” actuando cuanto el deterioro es menor y en zonas no generalizadas.

En esta etapa las armaduras sobre las que se actúa no han perdido capacidad estructural, simplemente puede ser que la armadura esta despasivada y además se presente una fisuración fina con pequeños desprendimientos, sin que el acero pierda una sección significativa.

2.10.1.1 Protección catódica

Esta técnica consiste en aplicar corriente a la armadura metálica que esta embebida dentro del hormigón para que se comporte toda como cátodo, suprimiendo así los ánodos de su superficie y con ello protegiendo la armadura de forma indefinida. (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024)

Esta corriente se puede aplicar de dos maneras:

- Con un ánodo de sacrificio que se corroe en lugar de la armadura de acero
- Con la aplicación de corriente continua de la adecuada polaridad

Esta corriente hace que la armadura se polarice a un potencial de signo negativo en el que no sufre corrosión.

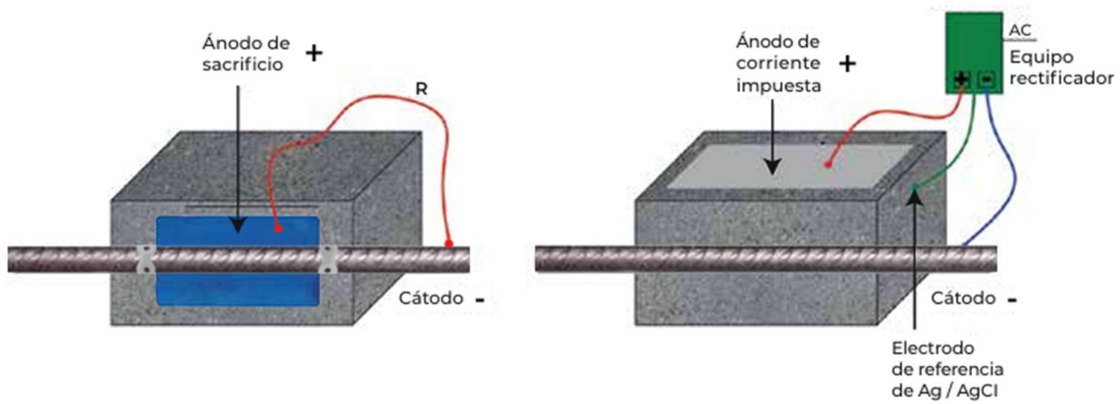


Figura 26 Sistemas de protección catódica: ánodos de sacrificio y corriente impuesta (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024)

2.10.1.1.1 Ánodos de sacrificio

Este proceso se basa en que se pueden utilizar técnicas que polaricen catódicamente las armaduras, mediante el uso de ánodos o bandas de sacrificio de zinc que, gracias a su potencial más negativo, protegen las armaduras evitando su corrosión.

Este fenómeno se basa en que la corrosión de la armadura no se desencadena siempre que su potencial se mantenga por debajo del potencial de corrosión. Y que mediante el acoplamiento de los dos metales (acero al carbono-zinc), las armaduras se pueden mantener pasivas evitando el inicio del fenómeno incluso en el caso de niveles altos de cloruro (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024).

A continuación, se muestra como estos ánodos deben colocarse y fijarse a las barras de la armadura de modo que queden bien sujetos para posteriormente se puede aplicar mortero de reparación sobre estos y que de esta manera queden embebidos en la matriz de hormigón.



Figura 27 Colocación de ánodo de sacrificio para posterior aplicación de mortero de reparación sobre la zona (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024)

2.10.1.1.2 Efecto Halo

Se debe tomar en cuenta que cuando se utilizan morteros de reparación con el objetivo de reconstruir las zonas en las que se han producido daños por corrosión de las armaduras debido a la presencia de cloruros, la zona que previamente era anódica pasa a ser catódica debido a la alta alcalinidad del mortero fresco.

Por lo tanto, la zona catódica anterior para a ser la nueva zona anódica y que, debido a la presencia de cloruros y humedad, si no se proporciona ningún otro medio de protección, aparecerá corrosión en el área circundante al área que ha sido objeto de reparación. Este fenómeno se conoce como “efecto halo” (Jimenez, 2019).

Con el objetivo de evitar este efecto, también se suele colocar ánodos de sacrificio en el parche y sus proximidades.

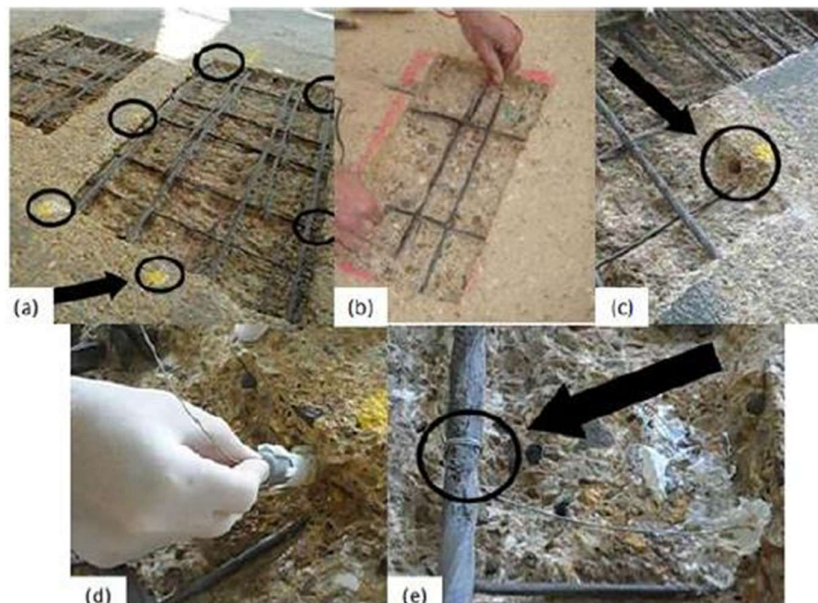


Figura 28 Disposición de ánodos de sacrificio en el perímetro de la zona de reparación (Jimenez, 2019)

2.10.1.1.3 Corriente impuesta

Este método consiste en la aplicación de corriente impuesta aplicada a través de una fuente de corriente continua de forma que el polo positivo se conecta a un ánodo auxiliar llamado electrodo dispersor de corriente y el polo negativo se conecta a la armadura de la estructura a proteger.

En estructuras a reparar, estos ánodos se han de colocar en un soporte que está preparado adecuadamente, eliminando el hormigón deteriorado y eliminando de la armadura expuesta todo resto de oxido para garantizar un buen contacto entre el acero y el mortero de reparación. Es muy importante que antes de instalar el ánodo de dispersión de corriente se debe verificar la continuidad eléctrica de la armadura con ayuda de un “tester” (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024).



Figura 29 Detalle de la instalación de ánodos de corriente impresa tipo malla en un pilar y viga antes de la aplicación del mortero de reparación (Andrade, Ortin, Soldevila, & Orte, 2024)

2.10.1.2 Reparación localizada con morteros de reparación

Este es el proceso fundamental y más usado para devolver la integridad y durabilidad a un elemento con daños localizados y sigue un protocolo estricto definido en distintas normas.

El proceso de reparación es el siguiente:

- **Preparación del soporte:** El objetivo es crear una superficie sólida, limpia y con textura adecuada para garantizar una perfecta adherencia del nuevo material. Para conseguir esto se recurre a técnicas como el picado y saneo de la zona para posteriormente eliminar todo el polvo y finos sueltos que se han generado y finalmente comprobar que no quede ninguna zona débil y con fisuras.
- **Saneo y pasivación de la armadura:** Tras preparar el soporte, también se debe preparar la armadura, tratando de eliminar todos los productos de la corrosión y crear una nueva capa pasivadora que proteja el acero.
Para conseguir esto se procede a una limpieza mecánica de las barras afectadas hasta alcanzar un grado de limpieza SA 2 ½ según la norma (Comite Tecnico CTN-UNE 48 Pinturas y Barnices, 2008). Y posteriormente se verifica que la sección actual de la armadura no ha perdido más de un 20-25% en comparación con su sección inicial (en el caso donde si haya perdido más sección se debe plantear la opción de realizar un refuerzo).
Finalmente se procede a la pasivación química con un pasivante de naturaleza alcalina, este producto forma una película protectora que evita la reoxidación de la barra antes de colocar el mortero de reparación.

- **Recomposición de la sección:** En esta etapa se aplica el mortero de reparación, donde el objetivo es restaurar la sección del elemento y proporcionar protección física y química a la armadura que quedara embebida dentro de este mortero. Para esto se debe humedecer el soporte y posteriormente, como opción recomendable (aunque no siempre se aplique), aplicar una capa de adherencia o puente de unión sobre el soporte húmedo para garantizar la máxima adherencia.
Finalmente, se aplica el mortero clase R4 según (Comite Tecnico AEN/CTN 83 Hormigon, UNE-EN 1504-3 Productos y sistemas para la proteccion y reparacion de estructuras de hormigon, 2006), que garantiza unas prestaciones mecánicas y de adherencia mínimas.

2.10.2 Técnicas de reparación cuando hay pérdida de capacidad portante

A diferencia de las anteriores, en esta etapa la corrosión ha avanzado más y las intervenciones son estructurales, enfocándose en recuperar e incluso incrementar la capacidad estructural que el elemento ha perdido.

Estas técnicas se aplican cuando las armaduras han tenido una pérdida de sección y la sección de hormigón también se ha visto reducida como consecuencia de la fisuración de este y el incremento en el volumen ocupado de los productos derivados de la corrosión que hace que el recubrimiento de la matriz de hormigón se desprenda.

Cuando se habla de una pérdida de sección considerable es importante tener un umbral de referencia en cada uno de los elementos estructurales (viga, columna, losa, muro, etc.) y el esfuerzo al que están sometidos (flexión, cortante, compresión, etc.) y si bien estos umbrales varían en función a estos factores, un criterio conservador y ampliamente aceptado es que una pérdida de sección superior al 15% en la armadura principal de cualquier elemento requiere una evaluación detallada y una posible actuación de refuerzo. O como también se menciona en otros trabajos, un coeficiente $K=0.85$ que indica la pérdida de seguridad estructural (Vazquez Fernandez, 2020).

2.10.2.1 Refuerzo con Fibra de Carbono (FRP)

Esta técnica consiste en adherir laminas o telas de fibra de carbono mediante el uso de resina epoxi a la superficie de hormigón, creando así un sistema compuesto que aumenta la capacidad resistente del elemento en cuestión. El material que se adhiere tiene unas prestaciones mecánicas, principalmente la resistencia a tracción, sobresalientes (Lopez, 2012).

En el mercado existen diferentes sistemas de presentación de refuerzos mediante adhesión externa de FRP, pero por lo general se divide en los siguientes dos sistemas.

2.10.2.1.1 Sistemas de refuerzos mediante adhesión externa de FRP

- **Materiales prefabricados:** Viene en forma de laminados, cintas o bandas. Estos laminados se pueden cortar en la longitud deseada y en función del refuerzo que se requiera se pueden colocar en varias capas hasta llegar a la resistencia deseada.



Figura 30 Presentación de los laminados de fibra de carbono (Lopez, 2012)

- **Materiales de tejidos de fibras:** Los tejidos a base de fibra se suelen presentar en rollos con anchos de entre 30 y 60 cm y con un largo de 40 a 100 m. Y al igual que los laminados se pueden cortar y colocar en varias capas envolviendo el elemento a reforzar.

Estos tejidos suelen presentarse del tipo unidireccionales o pluridireccionales y pueden ser impregnados a pie de obra mediante un sistema húmedo o en el lugar de colocación mediante un sistema en seco.



Figura 31 Presentación y aplicación de los tejidos de fibra de carbono (Lopez, 2012)

- **Resinas epoxi:** El último componente fundamental en este sistema de refuerzo es la resina epoxi, que es la encargada de garantizar la adhesión de estos refuerzos al soporte. Esta es la encargada de transmitir las cargas de manera adecuada entre el hormigón y las láminas de fibra de carbono, por lo que debe tener unas elevadas características mecánicas y reológicas.



Figura 32 Aplicación de adhesivo estructural en refuerzo FRP (SIKA, 2025)

2.10.2.1.2 Aspectos importantes a considerar

Si bien este es un sistema que tiene bastantes ventajas al requerir una invasión mínima al elemento a reparar y al no suponer un peso significativo para el elemento, pero al mismo tiempo incrementando su capacidad estructural.

Es importante tomar en cuenta que por un lado este sistema tiene un comportamiento deformacional lineal-elástico hasta llegar a la rotura, mientras que el acero lo tiene hasta llegar a la fase plástica, por lo que si no se diseña de manera adecuada puede suponer una rotura frágil en determinadas situaciones.

Y por otro lado, se debe dar mucha importancia al hecho de que la FRP pierde sus propiedades resistentes cuando está sometida a altas temperaturas, por lo que en ambientes donde se exija una determinada resistencia al fuego habrá que aplicar una capa aislante al fuego para prevenir la rápida degradación en la capacidad adherente y resistente o bien buscar otra alternativa de refuerzo estructural (Kodur, Bhatt, & Naser, 2019).

2.10.2.2 Reconstrucción de la sección de hormigón con armadura adicional

Esta técnica consiste en aumentar las dimensiones transversales de un elemento estructural (viga, pilar, losa, etc.) mediante la materialización de una nueva capa de hormigón armado que a su vez está conectada a la estructura ya existente.

El principio de este método es incorporar una nueva armadura para compensar las pérdidas causadas por corrosión aumentando así la capacidad portante y la inercia de la sección.

2.10.2.2.1 Proceso de intervención

Para la reconstrucción de una sección de hormigón armado en un elemento estructural que ha sufrido una pérdida de sección considerable se deben seguir el procedimiento y cumplir las siguientes condiciones establecidas en la UNE-EN 1504-3 (Comite Tecnico AEN/CTN 83 Hormigon, UNE-EN 1504-3 Productos y sistemas para la proteccion y reparacion de estructuras de hormigon, 2006):

- **Preparación y acondicionamiento del sustrato:** Se debe sanear y limpiar todo el hormigón carbonatado, desgranado y fisurado para dejar un soporte firme con una rugosidad considerable para garantizar el anclaje mecánico (si es necesario se debe picar la zona hasta conseguir la rugosidad deseada). Finalmente, así como con la superficie de hormigón, también se debe preparar la armadura existente que ha quedado vista, dejándola completamente limpia y con una capa de pasivante.
- **Incorporación del nuevo sistema de armadura:** La nueva armadura debe conectarse mecánicamente al hormigón antiguo ya sea mediante la perforación del hormigón existente e instalación de barras con anclaje químico o bien mediante la soldadura de las nuevas barras a la armadura existente (este método no es común, ya que las barras existentes deben ser soldables y se debe controlar la temperatura para no dañar el soporte).
Una vez ejecutadas las barras de anclaje se procede a la colocación de la nueva armadura longitudinal y transversal que confine la nueva sección y aseguren un trabajo conjunto de la pieza.
- **Hormigonado de la nueva sección:** Se debe preparar el soporte humedeciendo el hormigón existente para posteriormente emplear un mortero de reparación de clase estructural R4 que a su vez tenga un módulo de elasticidad y un coeficiente de dilatación térmica compatibles con el sustrato para evitar la generación de tensiones diferenciales. Finalmente se debe evitar huecos en zonas congestionadas de armaduras o problemáticas para garantizar la perfecta adherencia de la interfaz.
- **Curado y protección final:** Se debe controlar la retracción hidráulica mediante un curado húmedo e idealmente aplicar un sistema de protección superficial (hidrofugante, revestimiento) sobre toda la superficie del elemento, tanto las zonas antiguas como la zona reparada para homogeneizar la protección frente a agentes externos.

2.10.2.3 Sustitución parcial o total de la armadura

La sustitución de armaduras representa la intervención más agresiva y compleja dentro del espectro de las reparaciones estructurales. Es aplicable únicamente cuando la evaluación técnica concluye que la pérdida de sección de las armaduras es tan severa que compromete la capacidad resistente del elemento de forma irreversible, resultando en que las técnicas previamente descritas son insuficientes.

Este proceso implica la demolición controlada del recubrimiento de hormigón y la sección, para posteriormente extraer la armadura corroída y colocar una nueva, finalizando con la reconstrucción del elemento.

Al ser un proceso complejo y de alto coste, es necesario hacer un análisis coste-beneficio previo para ver si la intervención justifica el alto coste y complejidad de la intervención frente a otras alternativas como la sustitución del elemento.

2.10.2.3.1 Proceso de intervención

Después de haber realizado una evaluación de la pérdida de sección habiendo está superado los umbrales establecidos por la normativa, se procede a la secuencia crítica que se describe a continuación estando estrictamente controlada:

- **Apeos y descarga de la estructura:** Es imperativo instalar un sistema de apeo robusto para descargar completamente el elemento a sustituir. Este sistema debe estar dimensionado para soportar todas las cargas durante el proceso de sustitución.
- **Demolición selectiva y saneo:** Se procede a la retirada del hormigón de recubrimiento y la matriz dañada hasta dejar completamente vistas las armaduras a sustituir cuidando de no dañar el núcleo sano de hormigón ni las armaduras que se mantendrán.
- **Corte y extracción de armadura existente:** Una vez expuestas las barras corroídas se cortan con sierras de disco o equipo de oxicorte (cuidando de no dañar térmicamente las zonas aledañas), extrayendo así los tramos afectados.
- **Colocación y anclaje de la nueva armadura:** Habiendo retirado la armadura dañada se procede a colocar las barras nuevas con una calidad igual o superior a las previas. La conexión de la armadura antigua con la nueva se debe realizar mediante solapes mecánicos, calculando la longitud de solape en base a la posición de la barra, calidad del hormigón y condiciones de adherencia establecidas en la normativa vigente (Ministerio de Fomento, 2010).
- **Reconstrucción de la pieza:** Con la nueva armadura en su posición se procede al hormigonado y reconstrucción de la nueva sección siguiendo el mismo proceso que el detallado en el apartado 2.9.2.2 “Reconstrucción de la sección de hormigón con armadura adicional”.

2.10.3 Técnicas de protección superficial

Estas actuaciones, así como las primeras pueden considerarse actuaciones preventivas que incrementan la durabilidad del elemento. Creando una barrera física/química que retarda e impide la entrada de nuevos agentes agresivos como los cloruros y el dióxido de carbono.

Al ser intervenciones preventivas, no tienen como principal objetivo reparar el daño, sino prolongar la vida útil de la estructura y muy a menudo son un complemento que se aplica después de haber utilizado las técnicas de reparación previamente mencionadas.

2.10.3.1 Barreras de protección: Revestimientos e impermeabilizantes

Las barreras de protección cumplen una función de escudo físico y químico aplicado sobre la superficie del hormigón. Se basan en un principio básico y fundamental que consiste en modificar la capa superficial para sustituir de manera drástica su permeabilidad a agentes agresivos externos (agua, iones cloruro, dióxido de carbono, entre otros).

Estas barreras de protección no reparan daños existentes a diferencia de otros métodos previamente mencionados, sino que previenen y ralentizan el inicio de los procesos que deterioran la estructura, alargando de manera significativa el periodo de iniciación de la corrosión. Al ser un sistema de protección que actúa como una barrera, su eficacia depende de manera crítica de la continuidad, el espesor y la adherencia de la película y capa formada.

Estos revestimientos pueden ser de naturaleza acrílica, epoxi, de poliuretano, entre otros. Y suelen aplicarse por distintos métodos, mediante brocha, rodillo, pulverización o proyección. (Fundación Laboral de la Construcción, 2024). Por lo que a continuación se presentan los sistemas más utilizados y versátiles, cada uno con un grado diferente de protección y complejidad de aplicación.

2.10.3.1.1 Hidrofugantes de impregnación

Es un tratamiento que penetra en el hormigón y reacciona químicamente con la matriz volviéndola hidrófoba, de esta manera impide la entrada del agua en la estructura, pero a la vez permite el intercambio de vapor de agua con el ambiente. De esta manera si el agua accede a través de una superficie no tratada, esta puede salir al exterior en forma de vapor de agua permitiendo la “respiración” del elemento. (Mosquera, 2013)

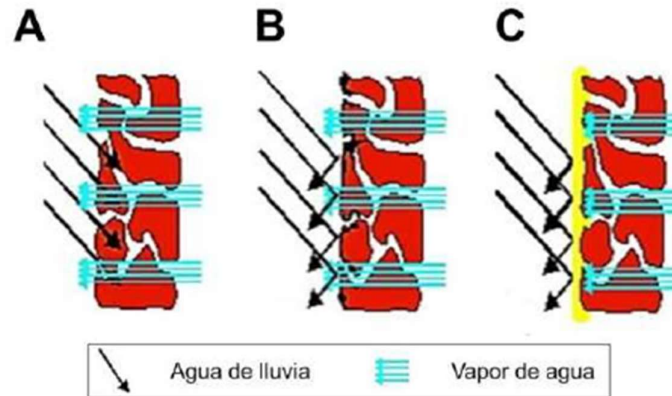


Figura 33 Representación de diferentes comportamientos de fachadas frente a la acción del agua. (A) Pared sin protección, (B) Pared hidrofugada en la que se forma una película superficial que reduce la entrada del agua líquida, permitiendo el intercambio de vapor de agua con el ambiente, (C) Pared impermeabilizada. (Mosquera, 2013)

Este sistema, aparte de ser permeable al vapor del agua como se ha visto, es de fácil aplicación y tiene un impacto visual ínfimo en la estructura. Pero como contraparte, no es un producto enfocado a la protección frente a otros agentes agresivos que contribuyen a la aceleración del proceso de la corrosión como lo son el dióxido de carbono y el cloruro.

2.10.3.1.2 Pinturas y revestimientos elastoméricos

Dentro de esta categoría, podemos encontrar sistemas bicapa o multicapa compuestos por una capa de fondo y una de acabado formulados a base de resinas acrílicas en dispersión acuosa que tras su aplicación forman una película continua, flexible y altamente adherente sobre la superficie de aplicación.

El mecanismo de protección es mixto ya que actúan como barrera física de baja permeabilidad al agua líquida y al dióxido de carbono. Por otro lado, tienen otro pilar igual de fuerte que es su alta elasticidad y capacidad de elongación, permitiéndoles absorber las tensiones generadas por la dilatación y contracción térmica del hormigón y también puenteando de manera eficaz la microfisuración del sustrato sin agrietarse, manteniendo así la barrera de manera íntegra. (Comite Técnico AEN/CTN 83 Hormigón, Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón, 2004).

2.10.3.1.3 Revestimientos epoxi

Estos revestimientos son sistemas de protección formados por resinas epoxi y endurecedores que tras su mezcla, aplicación y posterior reacción, forman una película rígida, densa y de muy baja permeabilidad. Estos revestimientos no se usan únicamente en suelos, sino también en situaciones y casos donde se exige una gran resistencia al ataque por agentes químicos, como ocurre en depósitos destinados a contener aceites, vinos, leche, agua destilada, petróleo, etc. (Canovas, 1967).

Por lo que se puede decir que su principal característica no es la elasticidad, a diferencia de otros sistemas tratados previamente, sino su excelente comportamiento como barrera física y excepcional resistencia a la abrasión y a otros productos químicos.

Antes de pasar al siguiente sistema, es importante considerar que, al momento de aplicar el revestimiento, el coeficiente de dilatación térmica que posee el hormigón base sobre el que se aplica este producto, es diferente al coeficiente del propio producto. Por lo que es preciso determinar si estos valores están dentro de los admisibles o si por el contrario son excesivos causando tensiones que son capaces de separar la capa epoxi de la base de hormigón.

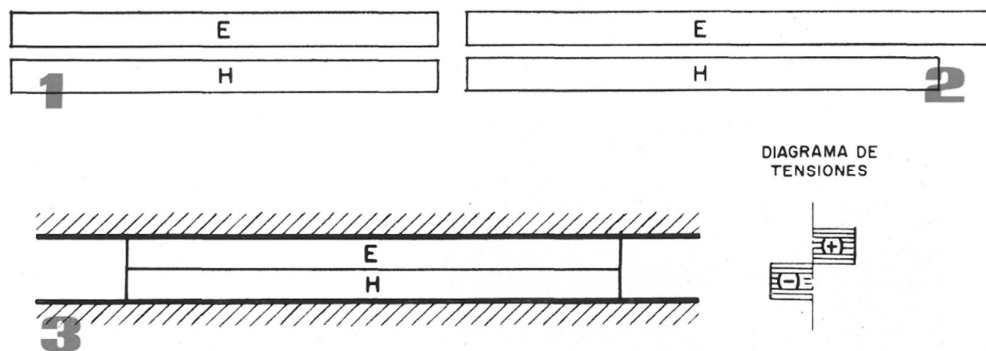


Figura 34 Esquema de un estado (1) previo a la deformación del hormigón base y el mortero epoxi, posteriormente un estado (2) donde se ve como la dilatación de uno y otro son diferentes y finalmente un estado (3) resultante de la aplicación de este sistema (Canovas, 1967)

2.10.3.1.4 Morteros de revestimiento modificados con polímeros

Estos morteros son materiales compuestos que combinan una matriz cementante tradicional con polímeros sintéticos, actuando como una barrera física y química que mejora las prestaciones del sustrato original compuesto de morteros tradicionales que no tienen por sí mismos una alta resistencia al desgaste e impermeabilidad.

La eficacia de este mortero como revestimiento se debe a la incorporación de polímeros que se dispersan en la formulación y que al hidratarse forman una especie de malla flexible y continua dentro de la matriz. Esta malla no solo mejora la adherencia a la base de mortero existente, sino que reduce de manera significativa la porosidad y el tamaño de los poros. Como resultado se obtiene un mortero más cohesivo, menos permeable y con una menor tendencia a fisurarse frente a movimientos estructurales y cambios térmicos. (Gonzalez L. A., 2014)

Cabe mencionar que estas mallas tienen un carácter aglomerante que rodea, protege y soporta al refuerzo de las condiciones medioambientales y de los esfuerzos mecánicos, entre los componentes más comunes se encuentran:

- Polipropileno (PP)
- Policarbonatos (PC)
- Poliamida (PA)
- Poliéster saturado (PET-PBC)
- Poliacetato
- Polisulfonato (PSUL)
- Epoxi (P)
- Vinilester (VE)
- Poliamidas (PI)
- Poliéster Insaturado (UP)
- Fenólicas (PF)

2.10.3.1.5 Membranas de poliurea

Como ultimo sistema a ver en este apartado se presentan a las membranas de poliurea. Un sistema de protección superficial de altas prestaciones que constituye un recubrimiento elastómero formulado a base de resinas de poliurea, se caracteriza por su curado rápido y la formación de una membrana continua, sin juntas y de alto espesor. Su aplicación mediante proyección a alta presión y temperatura permite la creación de una capa monolítica de espesor homogéneo incluso cuando las geometrías son complejas.

Este sistema se plantea como una protección integral ya que actúa como una barrera física de permeabilidad muy baja frente al agua, iones cloruro y dióxido de carbono. Sin embargo, su característica más distintiva es su excepcional elasticidad y capacidad de elongación (frecuentemente superior al 400%), combinada con su alta resistencia a la tracción. Esta combinación permite puentear las fisuras en el sustrato de hormigón y mantener la estanqueidad y protección incluso ante movimientos dinámicos o ciclos térmicos pronunciados. (Grupo Puma, 2024)

2.10.3.2 Inhibidores de corrosión migratorios

Los inhibidores de corrosión migratorios son compuestos químicos en forma de vapor o líquido que se aplican sobre la superficie de hormigón, poco a poco van penetrando la matriz a través de la red de poros hasta alcanzar las armaduras embebidas en el hormigón y se absorben sobre la superficie del acero formando una fina película molecular que frena y suprime las reacciones ánodo-cátodo de la corrosión. La principal ventaja de estos frente a otros sistemas es precisamente su capacidad de proteger la armadura en lugares de difícil acceso sin necesidad de realizar obras y actuaciones en la zona objeto de protección.

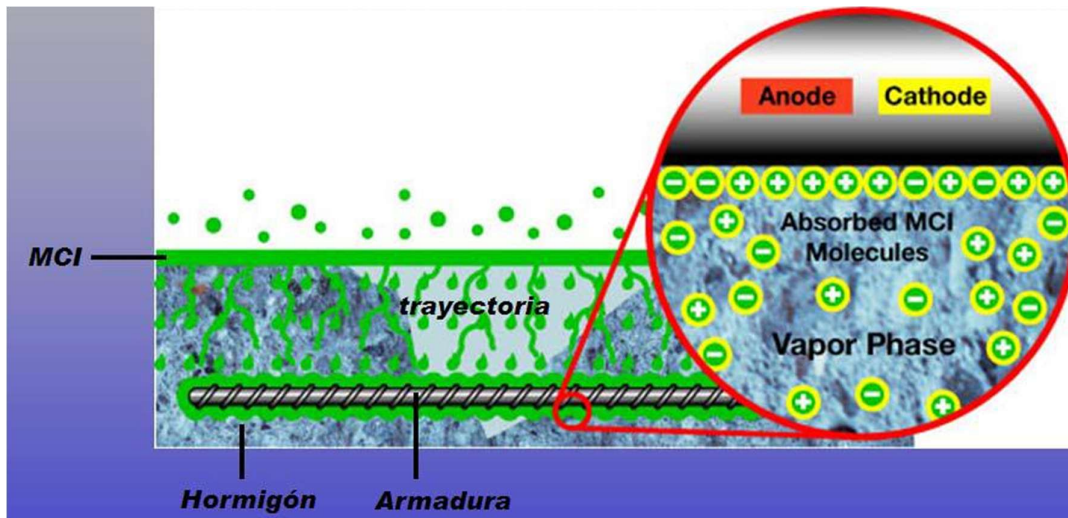


Figura 35 Viaje de los iones a través del hormigón atraídos por las áreas anódicas y catódicas de la armadura metálica debido a sus cargas "+" y "-" (Quimilock, 2019)

Dentro del mundo de los inhibidores de corrosión migratorios hay distintas composiciones químicas, cada una con distintas fortalezas y debilidades. Entre los más utilizados están los que tienen una composición en base a aminoalcoholes, los que están compuestos en base a aminocarboxilatos y finalmente los que contienen sales de nitrito.

2.10.3.2.1 Aminoalcoholes

Este tipo de inhibidores migratorios tienen una carga parcial positiva (+) y una carga parcial negativa (-) dentro de la propia molécula. Al tener estas cargas es atraída por el acero, aunque en términos absolutos la carga de la molécula es nula. Estos productos extienden ligeramente el tiempo de inicio de la corrosión y cuando esta da inicio disminuye la ratio de corrosión a la mitad (Quimilock, 2019). Aunque su eficacia puede disminuir con altas concentraciones de cloruros y su efecto es temporal y depende de la dosis aplicada pudiendo requerir una segunda aplicación para mantener la protección a largo plazo.

2.10.3.2.2 Aminocarboxilatos

Este tipo de inhibidores mejora las deficiencias del anterior ya que, si bien también tiene cargas positivas y negativas, parte de las moléculas que contiene reaccionan con el hormigón y dan como resultado un efecto de sellado a los poros, evitando así el futuro ingreso de atacantes externos. Al mismo tiempo las moléculas libres N^+ y COO^- se ven atraídas por las áreas catódicas y anódicas del acero dando como resultado una mayor atracción hacia el armado.

Estudios demostrados indican que estos duplican e incluso triplican el tiempo de inicio de la corrosión respecto a los que están compuestos por aminoalcoholes y en el periodo de inicio de la corrosión retardan cinco o más veces este fenómeno respecto a una superficie sin inhibidor.

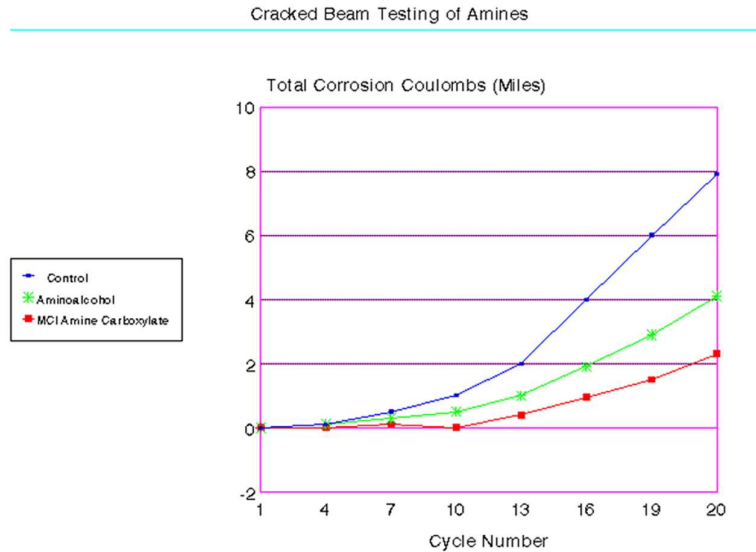


Figura 36 Grafica comparativa del poder de inhibición de la corrosión de diferentes tipos de inhibidores frente a un control (Quimilock, 2019)

2.11. Impacto ambiental de las reparaciones por corrosión en estructuras de hormigón

2.11.1 Introducción al impacto ambiental de materiales estructurales

2.11.1.1 Huella de carbono del hormigón y acero

Como es bien sabido, el sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 38% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía. (UN environment programme, 2020).

Por otro lado, distintos autores han concluido que la producción de cemento Portland genera aproximadamente 0.93kg de CO₂ por cada kg de cemento producido, mientras que el acero estructural emite entre 1.5kg a 2.0kg de CO₂ por cada kg de acero producido (Hammond & Jones, 2011).

Material	Production / GT	As % of total products (A)	CO ₂ emitted during production / GT	As % of total CO ₂ (B)	$I_p = B + A$
Concrete (RC + plain) ¹	19	57	2.7	9	0.16 ± 0.04
Steel ²	0.98	3	2.3	8	2.7 ± 1.1
Timber ³	2.1	6	5.4	18	2.9 ± 1.5

Figura 37 Producción y emisiones de CO₂ para los materiales estructurales principales en gigatoneladas (Purnell, 2013)

2.11.1.2 Impacto en el ciclo de vida completo

Partiendo de que el análisis del ciclo de vida evalúa los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de todas las etapas de su existencia.

Dentro del contexto de las estructuras este ciclo de vida se debe considerar no solo en las fases de producción de los distintos materiales que componen la estructura y de construcción del elemento, sino también en las fases de uso, mantenimiento, reparación y fin de vida de una estructura. De hecho, estudios de análisis de ciclo de vida indican que las actividades de mantenimiento y reparación pueden aumentar significativamente la huella de carbono del ciclo de vida de las estructuras de hormigón, particularmente en ambientes agresivos. (Purnell, 2013)

2.11.1.3 Métricas de evaluación ambiental

Existen distintas métricas de evaluación ambiental de manera general que aplican también en el contexto de las reparaciones por corrosión en obra civil. Estos indicadores son cuantificables y ayudan a medir, comparar y comunicar los efectos ambientales con las intervenciones que se realizan. Estas métricas se estructuran en tres categorías principales según la norma, que a su vez establece los requisitos para las Declaraciones Ambientales de Producto en el sector de la construcción (Comite Tecnico CTN 198, 2020).

a) Indicadores de impacto ambiental

- Potencial de calentamiento global (GWP): Es un indicador expresado en kg de CO₂ equivalente que cuantifica la contribución al cambio climático. Y cuando de huella de carbono se habla este es el indicador principal.
- Potencial de acidificación (AP): Este indicador evalúa la acidificación de los suelos y aguas por emisiones de SO₂, NO_x y NH₃, asociadas a procesos de combustión en fabricación y uso de diversos equipos.
- Potencial de eutrofización (EP): Mide el enriquecimiento excesivo de nutrientes en ecosistemas acuáticos vinculados a fertilizantes en la producción de materias primas y emisiones de nitrógeno.

- Potencial de formación de ozono troposférico (POCP): Valora la contribución al smog fotoquímico, que es relevante en disolventes y combustibles utilizados en distintos productos de protección.

b) Indicadores de uso de recursos

- Demanda de energía primaria: Este apartado distingue entre energía renovable (PERT) y energía no renovable (PENRT), expresada en megajulios. Esta es relevante si se quiere evaluar por ejemplo la intensidad energética de soluciones como los composites de fibra de carbono.
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP): Separa recursos fósiles de recursos minerales, permitiendo la valoración de los materiales con alta demanda de recursos escasos.
- Potencial de escasez hídrica (WDP): Medido en m³ de agua equivalente, considera el estrés hídrico local derivado de la producción de cemento y en obras con zonas que tienen escasez de recursos hídricos.

c) Indicadores de flujos de salida

- Residuos generados: Medidos en kg y se clasifican como peligrosos (HWD), no peligrosos (NHWD) o radioactivos (RWD).
- Materiales para reciclaje o valorización (MFR o MER): Informan sobre el potencial de la economía circular.

Si bien estas técnicas permiten analizar la sostenibilidad en general en el sector de la construcción, aplicándolo al objeto de este trabajo permitirían por ejemplo comparar entre distintas soluciones de reparación, evaluar el efecto del retraso (un mayor daño podría implicar una solución más intensiva y por lo tanto métricas más elevadas) y también nos ayudaría a priorizar las intervenciones considerando factores como el GWP.

2.11.2 Impacto ambiental de los materiales de reparación

2.11.2.1 Morteros de reparación

Los materiales comúnmente utilizados en reparaciones por corrosión presentan importantes cargas ambientales que deben considerarse al momento de elegir el material de reparación adecuado ya que este puede influir significativamente en la huella ambiental total de la intervención.

Un ejemplo son los morteros de reparación convencionales, que suelen caracterizarse por un elevado contenido de cemento Portland y aditivos químicos para garantizar una trabajabilidad rápida, adherencia inmediata y resistencia temprana. Estas exigencias técnicas, aunque necesarias para el éxito de la reparación, conllevan un incremento en el impacto ambiental respecto al hormigón usado originalmente.

A continuación, se muestra una tabla donde se compara un hormigón normalmente usado para construir una estructura nueva y un mortero de reparación que se usa para reparar estructuras:

	Hormigón	Mortero de reparación
Resistencia	25-35 MPA	+40 MPA
Adherencia	Media	Muy alta
Retracción	Normal	Compensada/baja
Aplicación	En masa	Capas delgadas (1-4cm)
Coste	Menor	Mayor

Tabla 9 Comparación entre un hormigón normal y un mortero de reparación. Elaboración propia

Si se toma como base una ficha de “Declaración Ambiental de Producto” de un mortero de reparación comúnmente usado. Se puede ver que el mortero de reparación está compuesto mayoritariamente por áridos finos, por un contenido de cemento alto y sobre todo que cuenta con un alto contenido de aditivos (otros) como polímeros, fibras y acelerantes.

Sustancia	Contenido (g de sustancia / kg de mortero)	Unidades	Variación
Sílice	507	(g de sustancia / kg de mortero)	±8%
Cemento	333	(g de sustancia / kg de mortero)	±7%
Caliza	79	(g de sustancia / kg de mortero)	±13%
Otros	81	(g de sustancia / kg de mortero)	-

Tabla 10 Principales componentes del producto. (PROPAMSA, Declaración Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparación., 2021)

Como esta ficha de DAP hay muchas otras en las que se puede observar el mismo resultado y es que los morteros de reparación presentan un impacto ambiental mayor que los morteros convencionales, con un incremento medio del 28% en el potencial de calentamiento global (Zhang, Wang, & Tam, 2021).

Esta mayor huella se atribuye principalmente a su mayor contenido de cementos especiales y la incorporación de aditivos poliméricos y fibras sintéticas, cuyos procesos de fabricación son intensivos en energía y recursos fósiles. Sin embargo, este impacto inicial se compensa con el incremento del ciclo de vida de la estructura objeto de reparación, ya que estos materiales

permiten extender la vida útil del elemento posicionando la reparación como una estrategia favorable frente al reemplazo integral.

2.11.2.2 Productos de protección y tratamiento

Los productos de protección y tratamiento para estructuras de hormigón corroídas tienen un impacto ambiental que no depende únicamente de su composición, sino también de su eficiencia a largo plazo, ya que una menor durabilidad puede producir la necesidad de reparaciones recurrentes y por tanto disminuir el impacto acumulado durante el ciclo de vida de la estructura. A continuación, se mencionan los más comunes y aplicados tradicionalmente en el sector:

- **Pasivantes de armaduras**

Es bien sabido que los inhibidores tradicionales contienen nitritos y distintos compuestos orgánicos que favorecen a la formación de capas pasivas y que estos son tóxicos para los medios acuáticos. Esta toxicidad es una preocupación ambiental bien documentada en estudios sobre corrosión de hormigón armado (Barbu, Fierascu, Semenescu, & Cotrut, 2025).

- **Hidrofugantes y selladores**

Los selladores y recubrimientos poliméricos suelen tener un impacto ambiental vinculado a su producción y aplicación, especialmente si contienen disolventes o compuestos orgánicos volátiles. También existen formulaciones al agua o con alto contenido de sólidos que reducen de manera significativa las emisiones de estos compuestos al momento de aplicarlos.

- **Pinturas de revestimiento y recubrimientos barrera**

Las pinturas de revestimiento por lo general contienen pigmentos de alta energía embebida cuya producción es intensiva en energía, contribuyendo así al GWP. Por otro lado, los disolventes y resinas emiten COV durante su aplicación y curado.

Para mitigar esto, se pueden aplicar revestimientos con base acuosa y con alto contenido en sólidos que reducen las emisiones de COV en hasta un 80% frente a sistemas tradicionales (Milic & Bleiziffer, 2024).

2.11.2.3 Refuerzos estructurales

Los refuerzos estructurales tienen un impacto ambiental que no se limita a la producción de los materiales empleados, sino también al transporte, aplicación y consumo energético durante obra. A continuación, se mencionan los más comunes y aplicados en el sector:

- **Composites de Fibra de Carbono (CFRP)**

El impacto ambiental derivado de los refuerzos con fibra de carbono es significativamente mayor en comparación con otros materiales convencionales como el acero, ya que se requiere una elevada energía para la producción de las fibras y las resinas. Estudios comparativos han demostrado que, bajo escenarios favorables, los diseños con CFRP pueden presentar reducciones de impacto climático de más del 18-28% frente a variantes convencionales, principalmente debido a la optimización del material y menor peso estructural (Milic & Bleiziffer, 2024).

- **Refuerzo tradicional de acero**

Este es uno de los materiales más utilizados dentro del sector conllevando grandes emisiones de CO₂, aunque su posterior reciclaje puede reducir de manera significativa la huella que deja (Martins, 2019). Junto con el hormigón y en combinación de este genera volúmenes de material y residuos de demolición que aumentan la contribución total de GWP en comparación con refuerzos menos invasivos.

- **Composites de Fibra de Vidrio (GFRP) u otras fibras**

Estos presentan un impacto menor de producción frente a los CFRP debido a procesos menos intensivos desde el punto de vista energético, pero por contraparte sus prestaciones mecánicas y durabilidad también son menos favorables. De esta forma, si se comparan los refuerzos de fibra de basalto (BFRP) o los de fibra de vidrio (GFRP) frente a los refuerzos de fibra de carbono (CFRP) se puede observar que generan menor impactos GWP por unidad de resistencia (Sbahieh, Mckay, & Al-Ghamdi, 2023).

2.11.3 Impacto de medios auxiliares en reparaciones

Los medios auxiliares como los andamios, plataformas autopropulsadas, maquinaria y equipos en general representan una fuente de impacto ambiental que por lo general es subestimada cuando de reparaciones se habla.

Sin embargo, en el contexto específico de la reparación derivada de la corrosión y otras patologías en obra civil, estos medios suponen un impacto ambiental considerable ya que el acceso complejo a estas estructuras y el hecho de que la mayoría de las reparaciones se hacen en altura o sobre cauces, derivan en que el consumo energético y las emisiones asociadas a estos medios puede alcanzar una magnitud igual o incluso superior a los propios materiales a emplear para realizar la reparación. Por lo tanto, una evaluación del impacto ambiental completa debe cuantificar no solo los impactos directos por morteros u otros materiales sino también de los derivados por el uso de distintos medios para poder hacer frente a las patologías en estructuras.

2.11.3.1 Andamios tubulares

Los andamios tubulares multidireccionales que se acoplan son la solución más común para accesos verticales y horizontales en reparaciones de puentes y su impacto ambiental procede principalmente de:

- **Fabricación del acero:** Cada kilogramo de acero estructural para andamiaje genera aproximadamente 1.8 - 2.2 kg CO₂ eq (Ecoinvent, 2024).
- **Transporte, montaje y desmontaje:** El impacto climático del montaje, uso y desmontaje de andamios tubulares se sitúa entre 1.2 - 1.8 kg CO₂ eq por cada m² de superficie andamiada (Gonzalez, Garcia, & Fernandez, 2020). Este valor puede variar de manera significativa dependiendo la eficiencia logística, la tipología de estructura y como consecuencia el tipo de componentes y reutilización de estos.
- **Vida útil y reutilización:** La huella de carbono por uso disminuye de manera significativa si se le da un buen mantenimiento y reutilización de manera óptima. De esta manera se puede extender la vida útil de un andamio a 10 ciclos, logrando una reducción del impacto del 50-65% en el último ciclo (Gonzalez, Garcia, & Fernandez, 2020).

2.11.3.2 Plataformas elevadoras móviles

Si las intervenciones a realizar no son generalizadas, requiriendo así el uso de un andamio, y requieren una actuación en una zona localizada se tiende a emplear plataformas elevadoras de brazo articulado o tijera que presentan un perfil ambiental completamente distinto al de los andamios tubulares:

- **Consumo energético durante uso:** Una plataforma a gasóleo tipo con un alcance de 15-18 metros consume aproximadamente 4.0 – 6.0 litros operando en un régimen intermedio, este consumo se traduce en unas emisiones de CO₂ eq. de 10.5 – 15.8 kg/h. (IPCC, 2006)
- **Impacto de fabricación:** La producción de una plataforma articulada telescópica de un peso estándar de 11.5 toneladas implica un impacto estimado de 10-15 ton de CO₂ eq. Esta estimación se basa en el impacto predominante de la producción de acero, que representa la mayor parte de la masa del equipo, utilizando un factor de 1.5 - 2.5 ton CO₂ eq. Por tonelada de acero (Pauliuk, Milford, Muller, & Allwood, 2013 47 (7)). Este impacto se amortiza a lo largo de su vida útil típica que varía entre 10 a 15 años con un mantenimiento adecuado.
- **Ventaja logística:** Aunque su impacto horario es elevado, permiten reducir tiempos de intervención y por lo tanto, pueden resultar en menores emisiones totales si sustituyen a los andamios donde el tiempo sería el equivalente a la duración del traslado, montaje, desmontajes y traslado nuevamente.

2.11.3.3 Maquinaria y equipos

El impacto ambiental de la maquinaria y equipos empleados en reparaciones por corrosión se deriva principalmente del consumo energético durante su operación y, en menor medida, de los procesos de fabricación y mantenimiento. A diferencia de los materiales de reparación – cuya huella se concentra en la fase de producción –, la maquinaria genera emisiones directas en obra, vinculadas al tipo de energía que utiliza. Los equipos que usan carburantes (martillos neumáticos, compresores, hormigoneras) emiten gases de efecto invernadero y contaminantes locales (NO_x, partículas) de forma inmediata, mientras que los eléctricos trasladan su impacto al mix energético del país. En intervenciones en puentes, donde el acceso es complejo y los tiempos de trabajo pueden prolongarse, el consumo energético de la maquinaria puede representar entre el 10% y el 25% de la huella de carbono total de la reparación según diversas fuentes.

La magnitud de este impacto depende críticamente de dos factores: la duración de la intervención y la eficiencia en la planificación logística. Equipos como las proyectadoras (maquinaria que despieza morteros, revestimientos, pinturas, etc. a presión), los equipos de corte y demolición controlada, o los sistemas de monitorización, tienen consumos específicos que varían según su tecnología y tamaño, pero su contribución ambiental se ve amplificada cuando el retraso en la intervención obliga a realizar trabajos más extensos o urgentes. Por ello, una evaluación ambiental completa debe considerar tanto la huella de los materiales usados como la energía consumida por la maquinaria necesaria para aplicarlos, especialmente si la reparación se extiende en el tiempo de una manera prolongada.

2.11.4 Gestión de residuos en reparaciones

Después de realizar una intervención para la reparación/rehabilitación de una estructura se procede a la gestión de los residuos derivados de dichas actuaciones. Estos constituyen una fase crítica ya que tienen implicaciones tanto económicas como ambientales.

Según distintas fuentes, el sector de la construcción y demolición genera en España aproximadamente 37 millones de toneladas anuales en residuos, de los cuales solo un 50% se valoriza (InfoConstrucción, 2024). Se debe tomar en cuenta que en intervenciones de rehabilitación por corrosión este porcentaje es menor debido a la presencia de contaminantes como los cloruros y sulfatos y a la mezcla de materiales de distinta naturaleza en un elemento que ya ha sido construido previamente.

Finalmente cabe mencionar que en cuanto a normas se refiere, la normativa de referencia exige un plan de gestión específico que priorice la prevención, reutilización y reciclaje frente al vertido de estos residuos (Ministerio de la Presidencia, 2008).

A continuación, se mencionan los tipos principales de residuos generados en este tipo de actuaciones y la gestión que se realiza en cada uno de ellos.

2.11.4.1 Hormigón contaminado (con cloruros o carbonatado)

Este es un residuo no peligroso (código LER 17.01.01) si la concentración de cloruros es <1% (RD 105/2008, Anejo II). En puentes en entorno marino o con sales de deshielo, puede superar ese umbral, requiriendo gestión como residuo peligroso.

- **Gestión recomendada:**

Trituración in situ o en planta para obtener árido reciclado.

Usos no estructurales: rellenos, sub-bases de firme, fabricación de nuevos hormigones no estructurales.

2.11.4.2 Barras de acero corroídas

Este es un Residuo no peligroso (LER 17.04.05), altamente valorizable.

- **Gestión recomendada:**

Separación en origen para evitar contaminación con hormigón. Esto no siempre suele ser viable ya que por norma general el acero corroído esta embebido en el propio hormigón, por lo que siempre suelen estar mezclados al momento de realizar la actuación.

Envío a gestor autorizado para fundición y fabricación de nuevo acero.

2.11.4.3 Materiales de encofrado y desechables

En el ámbito de las reparaciones se suele utilizar muy a menudo madera contrachapada, plásticos (film de polietileno), metales (sistemas modulares) como una solución complementaria y temporal al acabado definitivo de la reparación.

- **Gestión recomendada:**

Madera: Reutilización (hasta 4-6 usos en encofrados), posteriormente se procede a la trituración para tableros aglomerados o valorización energética.

Plásticos: Separación por tipos (PE, PP, PVC) para su posterior reciclaje mecánico si no están contaminados con mortero u otros residuos derivados de la reparación, caso contrario se procede a la valorización energética.

Metales: Reciclaje integral.

2.11.4.4 Residuos químicos (pinturas, inhibidores, resinas)

Por lo general, cualquier producto que sea un aditivo en base a resinas o pinturas que mejore las características de la matriz del hormigón o lo proteja de la intemperie, es clasificado como Residuo peligroso (códigos LER 08.01.11* para pinturas, 08.04.09* para resinas epoxi).

- **Gestión obligatoria:**

Separación estricta en contenedores específicos dependiendo el tipo de residuo.

Almacenamiento temporal con cubetos de retención y con tapa que los protejan de eventuales lluvias que causen la disolución de estos y produzcan una aportación de lixiviados al terreno donde se apoyan.

Gestor autorizado para valorización energética (incineración con recuperación de energía) o tratamiento físico-químico.

2.11.5 Impacto ambiental secundario

Cuando se habla de una intervención para la reparación de una estructura derivada por los efectos de la corrosión o en general de cualquier otra patología, debemos tomar en cuenta que existen impactos ambientales secundarios que no son directamente atribuibles a los materiales, maquinaria u otros medios. Sino que son efectos derivados de las externalidades de la propia intervención (como por ejemplo cambios en los patrones de la circulación, incremento de emisiones por desvíos, consumo energético de instalaciones temporales, riesgo de vertidos y contaminación accidental, etc.)

Estas externalidades por lo general no están cuantificadas en el ciclo de vida estándar de una estructura, pero si representan una porción del impacto total generado. Dependiendo la estructura y su función esta porción puede ser más o menos significativa, por ejemplo, en estructuras con un alto flujo de tráfico o ubicadas en entornos altamente sensibles.

En el contexto español y europeo, las guías y memorias técnicas que abordan la evaluación ambiental de infraestructuras incluyen la necesidad de considerar estas externalidades como parte de una evaluación amplia del proyecto. De entre las más relevantes se encuentra la guía del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y los trabajos del CEDEX que tratan de metodologías para evaluar el desempeño ambiental de las infraestructuras (MITECO, 2013).

2.11.5.1 Interrupciones del servicio

Entre los impactos ambientales secundarios más analizados se encuentran las interrupciones al servicio, donde se hace principal enfoque en los desvíos de tráfico generados durante la ejecución de la obra de mantenimiento o reparación. Se hace énfasis en estos desvíos por que suelen implicar el aumento de los kilómetros recorridos por los vehículos (Vehicle Kilometres Travelled, VKT), modificaciones en las condiciones de circulación y por lo general en situaciones de congestión que suelen implicar emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

Ha habido diversos estudios que han desarrollado metodologías específicas para cuantificar las emisiones producidas por este fenómeno. Estos casos de estudio proponen un marco de

evaluación basado en la estimación de VKT adicional inducido por los desvíos y su combinación con factores dependientes del tipo de vehículo y la velocidad de este.

Aplicando estos criterios a un caso real de una infraestructura viaria en Chongqing donde se propusieron cuatro alternativas de paso durante la fase de obra:

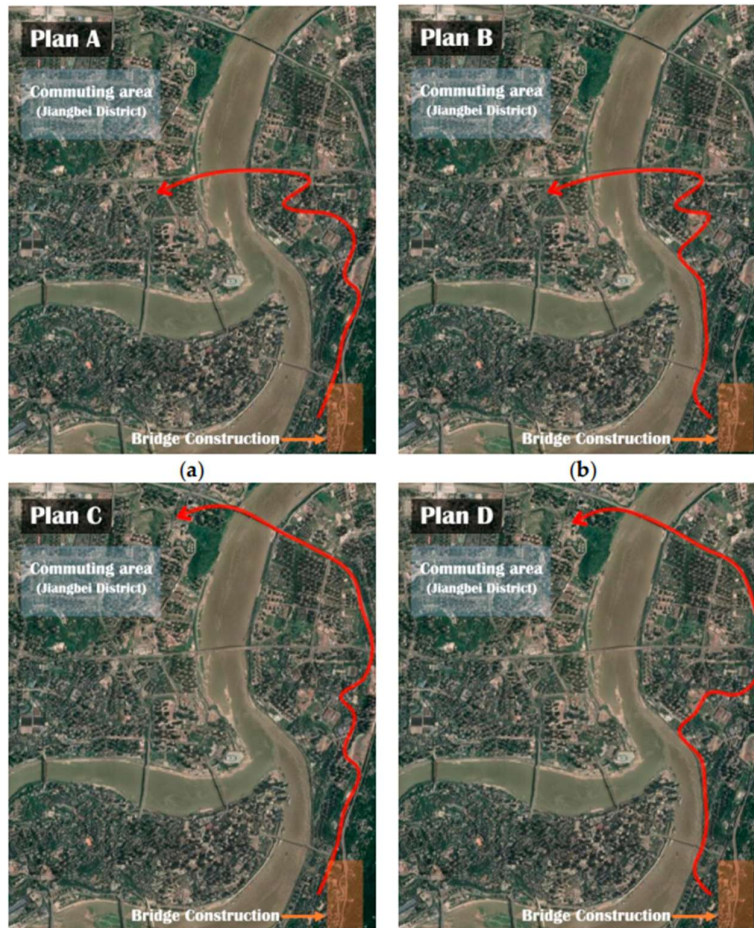


Figura 38 Desvío de cada uno de los cuatro planes del caso de estudio (Ma, Liu, & Li, 2023)

Se pudo concluir que las emisiones asociadas a cada uno de los desvíos durante la duración de las obras (210 días) pueden representar una fracción significativa del impacto climático total de la obra durante la fase de construcción (Ma, Liu, & Li, 2023).

Para la obtención de los factores de emisión en el citado estudio se utilizó el COPERT V (European Environment Agency, 2019), pero también existe otro llamado Handbook Emission Factors for Road Transport (INFRAS, 2022). Ambos modelos son útiles para estimar emisiones de CO₂, NO_x y partículas en función de la ya mencionada composición del parque vehicular, la velocidad media y las condiciones de tráfico. Finalmente, una práctica ampliamente utilizada para la cuantificación de emisiones asociadas a las interrupciones de servicio es la combinación de ambos métodos.

2.11.5.2 Riesgo ambiental por retraso

Este apartado, a diferencia del anterior esta menos desarrollado en la literatura, pero es relevante desde el punto de vista ambiental. Este riesgo implica el conjunto de impactos ambientales potenciales que aumentan con el tiempo de demora en la intervención.

Los estudios de gestión y priorización del mantenimiento de obra civil, en especial puentes, destacan que el retraso en las actuaciones puede conducir a un deterioro progresivo de la estructura, incrementando no solo los costes futuros de reparación, sino también las afecciones ambientales indirectas, implicando tener que realizar actuaciones futuras de reparación y mantenimiento más intensivas, con un mayor uso de materiales, generando un mayor volumen de residuos y mayores afecciones al tráfico (Gokasar, Deveci, & Kalan, 2022).

2.11.6 Estrategias de mitigación

En base a todo lo comentado previamente se puede ver de manera clara que el impacto ambiental derivado de la construcción y mantenimiento de estructuras conlleva una creciente concienciación ambiental, este fenómeno impulsa el desarrollo de estrategias de mitigación específicas de las reparaciones derivadas de la corrosión orientadas a reducir la huella ambiental sin comprometer la seguridad ni durabilidad de la estructura. Estas estrategias van desde la selección de materiales hasta distintas técnicas de intervención, ambas pensadas en incorporar los criterios de ciclo de vida y prevención del deterioro.

2.11.6.1 Materiales de bajo impacto ambiental

- **Geopolímeros y cementos alternativos**

Los geopolímeros y otros cementos alternativos al cemento Portland clásico, han sido ampliamente estudiados como materiales de menor huella de carbono. Su producción evita la calcinación del clinker que es la fase que más emisiones de CO₂ genera en cementos tradicionales.

El uso de estos geopolímeros muestra que pueden reducir considerablemente el impacto de carbono frente al concreto tradicional, debido al uso de subproductos industriales y a la eliminación parcial del clinker en la fase de producción (Fahim , Mirza, Ismail, & Ghoshal, 2017).

- **Composites con fibras naturales o recicladas**

El uso de fibras naturales (como sisal y cáñamo) o recicladas (como las fibras PET) en materiales cementicios ha sido propuesto como una estrategia para reducir el consumo de áridos vírgenes y aprovechar residuos industriales o agrícolas para mejorar la sostenibilidad.

Aunque las prestaciones específicas dependen de la formulación y correcta aplicación, la literatura sugiere que la incorporación de fibras recicladas puede mejorar la durabilidad y la ductilidad de los morteros además de aportar beneficios ambientales vinculados a la economía circular (Xing, Li, Wang, Li, & Song, 2025).

- **Inhibidores de corrosión verdes**

Estos inhibidores comprenden una amplia gama de compuestos de origen natural, principalmente extractos vegetales obtenidos a partir de hojas, semillas, frutas, entre otros que pueden absorberse sobre la superficie y alcanzar una eficacia inhibidora comparable a la de un inhibidor convencional, especialmente en medios con cloruros, actuando mediante la formación de películas protectoras sobre la armadura (Nwigwe & Nwoye, 2023).

A pesar de su potencial, la literatura coincide en que la mayoría de los inhibidores verdes se encuentran en fase experimental, existiendo una escasez de estudios a largo plazo en estructuras reales, limitando su normalización y aplicación en obras de reparación.

2.11.6.2 Técnicas de reparación sostenibles

- **Reparación con composites de fibra de carbono (CFRP)**

Si bien la fabricación de las fibras de carbono implica un impacto ambiental elevado, la relación resistencia-peso y su capacidad de prolongar la vida útil de elementos estructurales pueden resultar en impactos ambientales comparativamente menores a lo largo del ciclo de vida completo cuando se contrasta con técnicas invasivas que, por ejemplo, requieran demoliciones.

Estudios documentan que los refuerzos con CFRP son ampliamente usados en la rehabilitación estructural de puentes y otras infraestructuras gracias a su rapidez de aplicación, reducción de interrupciones al servicio, extensión de la vida útil, disminuir la frecuencia de intervenciones y mejora de la sostenibilidad global de la reparación (Teng, Chen, Smith, & Lam, 2002).

- **Sistemas de protección catódica**

Como ya se vio en un apartado anterior, la protección catódica es una técnica preventiva reconocida para combatir la corrosión de armaduras, lo que reduce la necesidad de intervenciones correctivas frecuentes y prolonga la vida útil de los elementos de hormigón armado especialmente en estructuras expuestas a cloruros u otros ambientes agresivos.

2.11.7 Datos ambientales y métricas de huella de carbono

2.11.7.1 Declaraciones ambientales de producto (DAP)

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), conocidas de manera internacional con el nombre de Environmental Product Declarations (EPD), son documentos que están normalizados y que proporcionan información cuantificada, objetiva y verificable sobre el impacto ambiental asociado a un producto a lo largo de su ciclo de vida. Estas declaraciones se basan en la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), lo que permite evaluar de forma sistemática las cargas ambientales derivadas de la extracción de materias primas, los procesos de fabricación y otras etapas relevantes del ciclo de vida del producto. (Comite tecnico AEN/CTN 150 Gestion Medioambiental, 2006)

Dentro de lo que sería el marco normativo, la ISO 14025 es la que regula las DAP de tal manera que se garantice que la información ambiental contenida en las DAP sea transparente, coherente y comparable, siempre que los productos evaluados cumplan la misma función y se elaboren conforme a reglas de categoría de producto comunes, estas reglas son fundamentales ya que aseguran que los indicadores ambientales publicados sean comparables entre productos equivalentes. (Technical Committee ISO/TC 207, 2006)

En el sector de la construcción y de la ingeniería civil, el uso de estas DAP se ha incrementado de manera notable como consecuencia de la incorporación de criterios de sostenibilidad en el diseño, la construcción y el mantenimiento de infraestructuras. Y en el ámbito específico de la reparación en cuanto a corrosión se refiere, estas DAP adquieren especial relevancia, ya que muchos de los productos habitualmente empleados disponen de declaraciones ambientales que permiten asociar de forma directa el consumo de materiales en una intervención con indicadores ambientales cuantificados.

2.11.7.2 Métrica ambiental adoptada

Las Declaraciones Ambientales de Producto incluyen diversos indicadores ambientales asociados a diferentes categorías de impacto, tales como el potencial de acidificación, la eutrofización, el agotamiento de recursos o la formación de ozono fotoquímico. Sin embargo, dentro del ámbito de la construcción e ingeniería civil, el indicador más empleado para evaluar el impacto ambiental de los materiales y procesos constructivos o de reparación es el Potencial de Calentamiento Global (GWP) que como se mencionó anteriormente se expresa en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq). (Comite Tecnico CTN 216, 2018)

El Potencial de Calentamiento Global, cuantifica la contribución total de los gases de efecto invernadero emitidos a lo largo del ciclo de vida de un producto, normalizando el efecto respecto de cada uno de los gases producidos respecto al dióxido de carbono en un periodo normalmente fijado de 100 años. Así las emisiones de gases como el metano u óxido nitroso se convierten en un valor equivalente de dióxido de carbono (CO₂), expresando el impacto ambiental en una sola métrica.

Esta adopción del GWP expresado en kg CO₂ eq como métrica ambiental principal responde a varios motivos importantes para el presente trabajo. En primer lugar, se trata del indicador más ampliamente utilizado y aceptado en los estudios de impacto ambiental. En segundo lugar, su interpretación resulta directa y comprensible, permitiendo relacionar de manera clara el consumo de materiales y la ejecución de determinadas intervenciones con su contribución al impacto climático. Finalmente, la disponibilidad de este indicador en distintos productos usados dentro del ámbito de la reparación es significativa, convirtiéndolo en una herramienta adecuada para la cuantificación del impacto ambiental de las actuaciones de reparación anteriormente mencionadas. (Technical Committee ISO/TC 207, 2006)

2.11.7.3 Unidad funcional y alcance del ACV

En los estudios basados en el Análisis de Ciclo de vida, la definición de una unidad funcional y del alcance del sistema son un aspecto fundamental a tomar en cuenta, estos dos elementos determinan la forma en la que se cuantifica y comparan los impactos ambientales asociados a un producto.

Por un lado, la unidad funcional establece la referencia cuantitativa a la que se asocian los resultados posteriores. De esta forma un impacto ambiental se expresa, por ejemplo, por kilogramo de producto, por metro cuadrado de superficie aplicada o por litros de producto aplicado. (Technical Committee ISO/TC 207, 2006)

Y por el otro lado, el alcance del ACV define las fases del ciclo de vida del producto que se incluye en el análisis, las DAP que se elaboran habitualmente conforme a la norma EN 15804, que es la encargada de estructurar el ciclo de vida en distintos módulos define estos de la siguiente manera:

- Módulos A - Fase de producto y construcción: A1 – A5
- Módulos B – Fase de uso: B1 – B7
- Módulos C – Fin de vida: C1 – C4
- Módulo D – Beneficios más allá del sistema

Numerosos estudios señalan que, en análisis centrados en la cuantificación del impacto ambiental de materiales y sistemas constructivos, el uso de los módulos A1, A2 y A3, correspondientes a la fase de producción, resulta una práctica común y adecuada, debido a la mayor disponibilidad y fiabilidad de los datos en esta etapa del ciclo de vida. (Pomponi & Moncaster, 2016)

En este trabajo, los datos ambientales procedentes de las DAP se interpretan teniendo en cuenta la unidad funcional declarada como el alcance del ACV considerado en cada documento. De esta forma se utiliza de manera coherente los valores de impacto ambiental y se relacionan con la magnitud de las intervenciones de reparación analizadas, sin pretender desarrollar un ACV completo de la infraestructura, sino emplear las DAP como fuente de factores ambientales representativos para la evaluación comparativa de distintas actuaciones.

2.11.7.4 Productos de reparación habituales con DAP disponible

En las intervenciones de reparación y protección de estructuras de hormigón afectadas por procesos de corrosión se ha mencionado previamente, en el apartado correspondiente, que se emplea una amplia variedad de materiales y sistemas constructivos. En los últimos años, numerosos fabricantes han desarrollado DAP para los materiales más habituales en este tipo de actuaciones, lo que permite disponer de información ambiental cuantificada y basada en el ACV para su posterior utilización en estudios de impacto ambiental.

A continuación, se muestra con un par de ejemplos como dentro de una DAP proporcionada por el fabricante se puede obtener distintos datos relevantes para el análisis del impacto ambiental:

- **Mortero de reparación**

El fabricante representa en una tabla distintos parámetros como el GWP, el ODP o el AP, como se mencionó el que es de importancia para el trabajo es el GWP. Por otro lado, también se puede observar que cada parámetro implica unos kg CO₂ eq dependiendo del módulo de Análisis de Ciclo de Vida (módulo A es la fase de producto y construcción, módulo B es la fase de uso, módulo C es el fin de vida y módulo D son los beneficios más allá del sistema). Cabe recalcar que la medida mostrada en la tabla es producida por 1 m² de mortero de reparación aplicado.

Parámetro	Unidades	A1	A2	A3	Total A1-A3	A4	A5	B1-B7	C1	C2	C3	C4	D
GWP-total	kg CO2 eq	6,76E+00	2,04E-01	1,75E-01	7,14E+00	6,93E-01	2,89E-03	NR	NR	1,34E-01	0,00E+00	1,06E-01	0,00E+00
GWP-fossil	kg CO2 eq	6,76E+00	2,04E-01	1,73E-01	7,14E+00	6,93E-01	2,85E-03	NR	NR	1,34E-01	0,00E+00	1,05E-01	0,00E+00
GWP-bio-genic	kg CO2 eq	3,75E-03	1,33E-05	1,01E-03	4,77E-03	4,51E-05	1,19E-05	NR	NR	8,39E-06	0,00E+00	6,42E-04	0,00E+00
GWP-luluc	kg CO2 eq	1,11E-03	1,68E-06	1,46E-03	2,58E-03	5,74E-06	1,95E-05	NR	NR	1,06E-06	0,00E+00	3,79E-05	0,00E+00
GWP-total-IPCC	kg CO2 eq	6,71E+00	2,03E-01	1,72E-01	7,09E+00	6,89E-01	2,84E-03	NR	NR	1,33E-01	0,00E+00	1,04E-01	0,00E+00
ODP	kg CFC11 eq	2,92E-07	4,93E-08	1,69E-08	3,58E-07	1,67E-07	3,10E-10	NR	NR	3,11E-08	0,00E+00	1,89E-08	0,00E+00
AP	mol H+ eq	1,94E-02	4,17E-04	1,23E-03	2,11E-02	1,87E-03	2,22E-05	NR	NR	2,65E-04	0,00E+00	9,80E-04	0,00E+00
EP-fresh-water	kg P eq	8,23E-05	1,26E-07	1,10E-05	9,34E-05	4,31E-07	1,73E-07	NR	NR	7,98E-08	0,00E+00	1,35E-06	0,00E+00
EP-fresh-water2	kg PO4--- eq	2,21E-03	4,08E-05	1,69E-04	2,42E-03	1,77E-04	1,71E-06	NR	NR	2,61E-05	0,00E+00	1,46E-04	0,00E+00
EP-marine	kg N eq	5,06E-03	6,85E-05	2,78E-04	5,40E-03	3,47E-04	3,18E-06	NR	NR	4,40E-05	0,00E+00	4,04E-04	0,00E+00
EP-terrestrial	mol N eq	5,76E-02	7,61E-04	3,08E-03	6,14E-02	3,86E-03	3,62E-05	NR	NR	4,91E-04	0,00E+00	4,43E-03	0,00E+00
POCP	kg NMVOC eq	1,50E-02	2,71E-04	8,90E-04	1,62E-02	1,24E-03	9,58E-06	NR	NR	1,74E-04	0,00E+00	1,22E-03	0,00E+00
ADP-minerals1	kg Sb eq	6,89E-06	1,25E-08	5,22E-07	7,42E-06	4,22E-08	3,39E-09	NR	NR	7,91E-09	0,00E+00	4,89E-08	0,00E+00
ADP-fossil1	MJ	4,40E+01	3,01E+00	3,24E+00	5,02E+01	1,02E+01	6,39E-02	NR	NR	1,90E+00	0,00E+00	1,40E+00	0,00E+00
WDP1	m3 depriv.	8,29E-01	-6,62E-04	2,17E-01	1,05E+00	-2,24E-03	1,72E-01	NR	NR	-4,18E-04	0,00E+00	3,45E-03	0,00E+00

Tabla 11 Impactos ambientales para un mortero de reparación. (PROPAMSA, Declaración Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparación., 2021)

- **Inhibidores de corrosión**

Al igual que el anterior ejemplo, el fabricante se vale de una tabla para ilustrar distintos indicadores y parámetros a tomar en cuenta, salvo que en este caso el alcance del ACV se reduce únicamente al módulo A. Las cantidades mostradas a continuación están obtenidas por cada 1000 kg de inhibidor de corrosión aplicado.

Table 5: Product Stage LCA Results for Corrosion Inhibitors						
CALCULATED RESULTS A1-A3 PER 1000 kg						
Core Mandatory Impact Indicator			Total	A1	A2	A3
Global warming potential	GWP	kg CO2e	568.00	392.48	39.25	136.27
Depletion potential of the stratospheric ozone layer	ODP	kg CFC11e	4.70E-05	2.56E-05	1.49E-09	2.14E-05
Acidification potential of soil and water sources	AP	kg SO2e	3.77	1.63	0.23	1.90
Eutrophication potential	EP	kg Ne	0.57	0.19	0.01	0.37
Formation potential of tropospheric ozone	SFP	kg O3e	24.71	12.88	6.40	5.43
Abiotic depletion potential for fossil resources	ADPf	MJ, NCV	8486.46	3354.18	505.07	4627.21
Abiotic depletion potential for non-fossil mineral resources	ADPe	kg Sbe	1053.00	289.89	75.13	687.98
Use of Primary Resources			Total	A1	A2	A3
Renewable primary energy carrier used as energy	RPRE	MJ, NCV	199.32	169.78	0.00	29.54
Renewable primary energy carrier used as material	RPRM	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00
Non-renewable primary energy carrier used as energy	NRPRE	MJ, NCV	10290.03	4486.40	535.54	5268.09
Non-renewable primary energy carrier used as material	NRPRMM	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00
Secondary Material, Secondary Fuel and Recovered Energy			Total	A1	Total	A1
Secondary material	SM	kg	0.00	0.00	0.00	0.00
Renewable secondary fuel	RSF	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00
Non-renewable secondary fuel	NRSF	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00
Recovered energy	RE	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00
Mandatory Inventory Parameters			Total	A1	A2	A3
Consumption of freshwater resources	FW	m3	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicators Describing Waste			Total	A1	A2	A3
Hazardous waste disposed	HWD	kg	0.00	0.00	0.00	0.00
Non-hazardous waste disposed	NHWD	kg	34.82	0.00	0.00	34.82
High-level radioactive waste, conditioned, to final repository	HLRW	m3	5.95E-10	4.91E-10	0.00E+00	1.03E-10
Intermediate- and low-level radioactive waste, to final repository	ILLRW	m3	5.53E-09	4.59E-09	0.00E+00	9.44E-10
Components for re-use	CRU	kg	0.00	0.00	0.00	0.00
Materials for recycling	MR	kg	0.00	0.00	0.00	0.00
Materials for energy recovery	MER	kg	0.00	0.00	0.00	0.00
Recovered energy exported from the product system	EE	MJ, NCV	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 39 Impactos ambientales para un inhibidor de corrosión (GCP Applied Technologies Inc., 2022)

2.11.7.5 Limitaciones y coherencia metodológica

La evaluación ambiental que se va a desarrollar en el apartado de metodología e investigación se apoya en datos procedentes de Declaraciones Ambientales de Producto, empleadas como fuente de factores ambientales para la cuantificación del impacto asociado a distintas intervenciones de reparación. No se pretende, por lo tanto, la realización de un Análisis de Ciclo de Vida completo de una estructura, ya que dicho enfoque excede el alcance del presente trabajo, requiriendo un nivel de detalle y disponibilidad de datos que en muchos casos no resulta alcanzable.

Asimismo, debe tenerse en cuenta que no todos los productos y fabricantes disponen de DAP que contemplen la totalidad de los módulos de ciclo de vida definidos en la norma EN-15804. Los datos correspondientes en las fases de uso, mantenimiento y fin de vida representan una mayor incertidumbre y una menor homogeneidad entre productos.

En este contexto, el estudio posterior adopta un enfoque coherente y consistente, centrado en el uso de los módulos de ciclo de vida para los que existe mayor disponibilidad y fiabilidad de datos, empleando las DAP como herramienta para la cuantificación relativa del impacto ambiental de las intervenciones analizadas. Este planteamiento permite evaluar de forma comparativa el impacto ambiental asociado a diferentes escenarios de reparación, sin incurrir en las incertidumbres inherentes a un ACV completo de una estructura.

2.12. Bases de precios para la evaluación económica de las intervenciones

2.12.1 Evaluación económica en conservación de infraestructuras ferroviarias

La evaluación económica es un elemento fundamental en la gestión y conservación de infraestructuras ferroviarias, ya que esta permite apoyar la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento, la reparación y rehabilitación de estructuras existentes. Especialmente en redes ferroviarias tan extensas como lo es la de España, la asignación eficiente de recursos resulta un aspecto fundamental para garantizar la seguridad estructural y a la vez la continuidad del servicio.

Dentro de la ingeniería de puentes, la evaluación económica de las actuaciones de reparación y conservación se ha abordado mediante el análisis de costes asociados a distintas estrategias de mantenimiento, considerando las intervenciones preventivas y correctivas. Así mismo, diversos estudios concluyen que el retraso en la ejecución de reparaciones suele conllevar un incremento en los costes directos de la intervención debido a la progresión a través del tiempo de las patologías (en este caso específico la corrosión) y a la necesidad de emplear cada vez técnicas más complejas, extensas e invasivas. (Stewart & Rosowsky, 1998).

A lo previamente mencionado se debe añadir que si se centra este análisis en las infraestructuras ferroviarias se presentan más particularidades propias del entorno de explotación, tales como las elevadas exigencias de seguridad, restricciones de acceso a las estructuras y la necesidad de compatibilizar los trabajos de conservación con la circulación ferroviaria. Estas condiciones incrementan aún más los costes asociados a medios auxiliares,

mano de obra especializada y gestión integral de la obra, reforzando así la necesidad de una evaluación económica rigurosa cuando de planificación de intervenciones se habla.

Por ese motivo y en este contexto, es una práctica habitual el uso de bases de precios normalizadas y de descompuestos de partidas, estas son herramientas adecuadas para garantizar una correcta evaluación económica de distintas soluciones e intervenciones.

En este trabajo la evaluación económica permitirá cuantificar el impacto económico asociado a las intervenciones de reparación necesarias en función del grado de deterioro alcanzado. Este enfoque resulta relevante para el análisis del efecto del retraso en las reparaciones, ya que permite relacionar la evolución del daño estructural con el incremento de los costes de intervención, aportando una visión integrada de las consecuencias económicas de la gestión diferida de la conservación.

2.12.2 Cuadro de precios de ADIF

Como se mencionó anteriormente el cuadro de precios constituye una herramienta fundamental para la valoración económica de las actuaciones de conservación y reparación en infraestructuras ferroviarias, al proporcionar precios unitarios de referencia para las distintas partidas de obra habitualmente empleadas. En el caso específico de la red ferroviaria española, el Cuadro de Precios de ADIF se configura como una base económica normalizada que recoge los costes asociados a trabajos de mantenimiento, reparación y renovación de infraestructuras, incluyendo estructuras de paso y puentes ferroviarios.

Este cuadro de precios incluye partidas relacionadas con trabajos habituales relacionados con la conservación de estructuras de hormigón armado en general y de manera específica para este trabajo reparaciones derivadas por el efecto de la corrosión. Las partidas específicas tales como las reparaciones con morteros estructurales, tratamientos de protección superficial, saneado de hormigón deteriorado, sustitución de armaduras o aplicación de sistemas de refuerzo se expresan en este cuadro de precios en términos de precios unitarios por unidad de obra (m^2 , m^3 , unidad, ml, etc.), lo que permite vincular de manera directa la magnitud de la intervención con su coste económico. (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2022)

Desde un punto de vista metodológico, este cuadro es adecuado para estudios centrados en la infraestructura ferroviaria, ya que es una fuente alineada con las condiciones reales de ejecución en obra, que a la vez permite relacionar el grado de deterioro de la estructura con el impacto económico derivado de las reparaciones necesarias.

2.12.3 Base de precios de ADIF y descompuestos

Este elemento constituye un desarrollo detallado del Cuadro de Precios, ya que proporciona el desglose económico de cada partida de obra mediante lo que se denomina un “descompuesto de precios”.

Este descompuesto desglosa el coste unitario de una partida en sus distintos componentes básicos, incluyendo de manera general los materiales, mano de obra, maquinaria y medios auxiliares, así como los rendimientos asociados a cada uno de ellos. (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2025) De esta manera se puede identificar de forma explícita los factores que influyen en el coste final de una intervención y facilita la adaptación de los precios a las condiciones específicas de cada obra.

A continuación, se muestra un par de ejemplos del descompuesto que se obtiene en la Base de Precios de ADIF en distintas unidades de obra presentes en la reparación de una estructura donde la corrosión está presente:

- Reconstrucción de sección de hormigón con mortero de reparación clase R4**
 En esta unidad se pueden observar las condiciones específicas que definen esta unidad de obra en concreto y el descompuesto del precio de la unidad en mano de obra, material y costes indirectos.

OGA140\$ - RECONSTRUCCIÓN DE SECCIÓN DE HORMIGÓN

TIPO DE MORTERO	ESPESOR	TRABAJO	BANDA DE MANTENIMIENTO
<input checked="" type="radio"/> clase R4 con fibras <input type="radio"/> clase R4 sin fibras <input type="radio"/> clase R3	<input type="radio"/> 2 cm <input checked="" type="radio"/> 4 cm	<input checked="" type="radio"/> Diurno <input type="radio"/> Nocturno <input type="radio"/> Cualquier franja horaria	<input checked="" type="radio"/> ≥ 5 horas <input type="radio"/> $3 <= i < 5$ horas <input type="radio"/> $1 < 3$ horas <input type="radio"/> No necesita intervalo

OGA140baaa - Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm con mortero clase R4 con fibras. (D)>5/-	202,03 €/m2
Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero de clase R4 (según UNE EN 1504-3) fluido monocomponente, resistente a los sulfatos de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada; con un consumo de 1,9 Kg/m2 por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >15 N/mm2, y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: $i > 5$ horas.	

Descompuesto					
Código	Unidad	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
MOC0000100	h	CAPATAZ	23,36 €/h	0,0660	1,54 €/m2
MOC0000200	h	OFICIAL 1A	22,87 €/h	0,3300	7,55 €/m2
MOC0000600	h	AYUDANTE	21,70 €/h	0,3300	7,16 €/m2
MOC0000400	h	PEÓN ESPECIALISTA	21,44 €/h	0,6600	14,15 €/m2
MN01010001	m3	AGUA	0,57 €/m3	0,2600	0,15 €/m2
MN01070016	kg	MORTERO ESTRUCTURAL, CLASE R4, REFORZADO CON FIBRAS, FLUIDO, SULFORRESISTENTE Y DE RETRACCIÓN COMPENSADA	1,32 €/kg	76,9200	101,53 €/m2
MN16020301	ud	PUNTAL METÁLICO TELESCÓPICO 3 M	20,61 €/ud	2,0000	41,22 €/m2
MN01120030	m2	TABL.CONTR.FENÓLICO 18 MM.4P.	8,74 €/m2	1,1000	9,61 €/m2
MN01120023	m3	MADERA DE PINO	335,34 €/m3	0,0200	6,71 €/m2
MN01120024	kg	PUNTAS DE ACERO DE 20X100 MM	9,74 €/kg	0,0890	0,78 €/m2
MN01100002	kg	ALAMBRE RECOCIDO Ø 1,3 MM	1,30 €/kg	0,1500	0,20 €/m2
%CIND	%	Costes indirectos	190,60 €/m2	0,0600	11,44 €/m2

Figura 40 Precio descompuesto de la unidad "Reconstrucción de sección de hormigón" (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2025)

- **Aplicación de pintura anticarbonatación**

En esta unidad se pueden observar las condiciones específicas que definen esta unidad de obra en concreto y el descompuesto del precio de la unidad en mano de obra, material y costes indirectos.

OGA190\$ - PINTURA ANTICARBONATACIÓN

TRABAJO	BANDA DE MANTENIMIENTO
<input checked="" type="radio"/> Diurno <input type="radio"/> Nocturno <input type="radio"/> Cualquier franja horaria	<input checked="" type="radio"/> 1 >= 5 horas <input type="radio"/> 3 <= 1 < 5 horas <input type="radio"/> 1 < 3 horas <input type="radio"/> No necesita intervalo

OGA190\$a - Pintura anticarbonatación. (D/>>5/). 14,56 á.- / m2

Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminada. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m2 en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: 1 >= 5 horas.

Descompuesto					
Código	Unidad	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
MOC0000100	h	CAPATAZ	23,36 á.-	0,0198	0,46 á.-
MOC0000200	h	OFICIAL 1A	22,87 á.-	0,1980	4,53 á.-
MOC0000600	h	AYUDANTE	21,70 á.-	0,1320	2,86 á.-
MOC0000400	h	PEÓN ESPECIALISTA	21,44 á.-	0,0550	1,18 á.-
MND1140004	kg	PINTURA ANTICARBONATACIÓN PARA HORMIGÓN ARMADO O PRETENSADO A BASE DE PINTURA DE RESINAS ACRÍLICAS	7,85 á.-	0,6000	4,71 á.-
%CIND	%	Costes indirectos	13,74 á.-	0,0600	0,82 á.-

Figura 41 Precio descompuesto de la unidad "Pintura anticarbonatación" (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, 2025)

Como se pudo observar con los ejemplos previos, el uso de estos descompuestos permite disponer de información detallada sobre consumos de materiales y distintos recursos para cada tipo de intervención, haciendo posible relacionar de manera directa la magnitud del daño estructural con el coste económico de su reparación. Posteriormente se puede reflejar el incremento de costes asociado al empeoramiento de la patología y la necesidad de aplicar técnicas de reparación más complejas desde un punto de vista de ejecución y técnico.

2.12.4 Alcance de la valoración económica

La valoración económica desarrollada en el presente trabajo se basa en los precios unitarios obtenidos de la Base de Precios de ADIF (BPA) y de los Cuadros de Precios de ADIF, que servirán para estimar los costes asociados a las intervenciones de reparación en infraestructuras ferroviarias.

Dichos precios unitarios se obtienen a partir de descompuestos que incluyen los costes directos de ejecución, tales como materiales, mano de obra y medios auxiliares, reflejando de forma coherente las condiciones habituales de las obras de conservación en el ámbito ferroviario.

Es importante tomar en cuenta que los precios unitarios de la BPA incorporan un porcentaje fijo de costes indirectos de obra, habitualmente del 6 %, aplicado de manera homogénea a todas las unidades de obra. Este porcentaje recoge aquellos gastos necesarios para la correcta ejecución de los trabajos que no pueden imputarse directamente a una partida concreta,

como la organización de obra o determinados medios auxiliares generales, contribuyendo a una valoración económica más realista de las actuaciones.

Sin embargo, este porcentaje es una estimación técnica de obra ya que no incluye gastos generales del contratista o el beneficio industrial del contratista, ya que su inclusión requeriría hipótesis adicionales y datos específicos que exceden el alcance del presente estudio. Este enfoque permite centrar el análisis en la relación directa entre el grado de deterioro estructural y el coste económico de su reparación, garantizando la coherencia y comparabilidad de los resultados obtenidos.

2.12.5 Limitaciones del enfoque económico

Si bien las fuentes de datos de donde se obtienen los valores para hacer la valoración económica provienen de un medio oficial como lo es el propio Administrador, se debe reconocer que estas bases contienen limitaciones inherentes.

En primer lugar, los costes empleados representan valores de referencia basados en unidades de obra tipo y rendimientos medios, no recogiendo así las particularidades que se presentan en una intervención real que presenta condicionantes singulares en temas de acceso a la estructura objeto de reparación, condiciones climatológicas, restricciones temporales excepcionales, etc.

Y en segundo lugar, como ya se mencionó previamente este análisis incluye los costes directos de cada unidad, así como un coste indirecto fijo que no representa la totalidad del coste indirecto real que tendrá el contratista que realice la intervención. La decisión metodológica de tomar únicamente los precios establecidos por el Administrador permite centrar el análisis en la relación directa entre el estado de deterioro de la estructura y el coste de su reparación, permitiendo así extraer conclusiones robustas en términos de tendencias y ordenes de magnitud, sin comprometer la validez del análisis ni introducir hipótesis adicionales que podrían incrementar la incertidumbre de los datos.

3. Investigación

3.1. Identificación del gap de conocimiento

Como se pudo ver en el estado del conocimiento la corrosión de armaduras constituye uno de los principales mecanismos de deterioro en las estructuras de hormigón armado de la red ferroviaria. También ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista de los procesos fisicoquímicos, la modelización del daño y la durabilidad de los materiales. La literatura técnica recoge numerosos modelos que permiten describir la iniciación y propagación de la corrosión, así como guías y manuales de inspección que establecen criterios para la evaluación del estado de las estructuras.

Asimismo, existen herramientas sólidas para la valoración económica de las intervenciones de reparación y fuentes normalizadas para la cuantificación del impacto ambiental de los materiales empleados en obra.

Sin embargo, a pesar de esta abundancia de información y estudios, se identifica un vacío de conocimiento en la integración práctica de estos ámbitos en el contexto de la gestión real de infraestructuras ferroviarias. En concreto, no se dispone de metodologías orientadas a la administración que permitan traducir de forma directa el estado observable de degradación por corrosión de un elemento estructural en una estimación inmediata y comprensible de su coste económico y de su impacto ambiental asociado.

La mayoría de los enfoques existentes se centran bien en la predicción teórica del deterioro o bien en la evaluación detallada de soluciones de reparación, sin proporcionar herramientas prácticas y operativas que faciliten la toma de decisiones en fases tempranas de la degradación.

Este gap resulta aún más relevante en el ámbito de la conservación ferroviaria, donde las decisiones no se basan habitualmente en modelos predictivos caso a caso, sino en inspecciones periódicas, priorización de actuaciones y asignación de recursos en función del estado observado de las estructuras.

En este contexto, la ausencia de sistemas de clasificación que vinculen de manera sistemática los estadios de degradación por corrosión con ordenes de magnitud de coste económico e impacto ambiental dificulta la evaluación de las consecuencias asociadas al retraso en la intervención.

El presente trabajo aborda este gap mediante el desarrollo de un enfoque basado en estadios de degradación aplicados a un elemento estructural en concreto, proporcionando así una herramienta que conecta la inspección, reparación, coste e impacto ambiental de manera alineada con la operativa y toma de decisiones de la administración.

3.2. Metodología general de la investigación

La metodología adoptada en el presente trabajo se plantea desde un enfoque aplicado y orientado a reproducir las condiciones reales en las cuales se gestionan y conservan las estructuras ferroviarias por parte del administrador. En base a esto el objetivo no es desarrollar un modelo predictivo detallado del deterioro estructural, sino establecer una herramienta práctica de apoyo al momento de la toma de decisiones que permita relacionar el estado observable de degradación por corrosión de un elemento estructural con el coste económico y el impacto ambiental asociados a su reparación.

La base de la investigación se apoya en el análisis de documentación técnica real procedente de actuaciones de rehabilitación de estructuras ferroviarias gestionadas por ADIF. En concreto se emplean como base dos campañas de mantenimiento:

- Servicios de mantenimiento y obras de mejora de puentes de hormigón y fábrica de la red administrada por ADIF. Lote 2: Zona Noreste-Este.
- Contrato de servicios de reparación de puentes de hormigón y fábrica. 2 Lotes. Lote 2.- Subdirección de operaciones Centro, Este y Sur.

En cada una de estas campañas se cuenta con un lote de puentes objeto de reparación y con informes y documentación que son de vital importancia para este trabajo, como ser:

- Informes de inspección principal
- Informes de riesgo
- Informes de inspección especial
- Informes de propuestas de actuación
- Informes de fin de obra
- Informes fotográficos
- Documentación complementaria

Con esta base de datos es posible identificar de forma objetiva los tipos de daños observados, las superficies afectadas, las soluciones de reparación finalmente adoptadas y los costes reales asumidos por la administración. Con el fin de acotar el alcance del estudio y garantizar la coherencia de resultados, el análisis se limita a un único elemento estructural: las vigas tipo π de hormigón armado.

A partir de esta base empírica, la metodología se estructura en varias fases sucesivas. Como primer paso se define una serie de intervenciones tipo de reparación, representativas de las actuaciones habituales frente a la corrosión en vigas tipo π , tales como el saneado del hormigón deteriorado, la pasivación de armaduras, la recomposición con morteros de reparación estructural, la aplicación de inhibidores de corrosión, la protección superficial mediante pinturas anticorrosión y, en estadios críticos, el refuerzo estructural.

En paralelo, para cada una de estas intervenciones se obtienen unos costes unitarios expresados en €/m² a partir de la Base de Precios de ADIF, considerando los descompuestos de las partidas y los costes indirectos de obra incluidos en dicha base (que no representan los costes indirectos reales que tiene el contratista).

Por otro lado, también se establece una metodología simplificada para la cuantificación del impacto ambiental de cada una de estas intervenciones tipo. Para los materiales que se utilizan en la reparación de estos elementos se utilizan datos procedentes de las Declaraciones Ambientales de Producto, utilizando como indicador el Potencial de Calentamiento Global expresado en kg de CO₂ equivalente. En el caso de la mano de obra y los medios auxiliares, cuyo impacto resulta más difícil de cuantificar de forma precisa sin desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida completo, se adopta un enfoque conservador y coherente con el alcance del estudio, justificando las hipótesis asumidas y las exclusiones realizadas.

Sobre la base de las intervenciones tipo y de los datos económicos y ambientales asociados se definen cuatro estadios de degradación por corrosión, que se caracterizan por criterios observables durante la inspección y rangos de superficie afectada respecto al total del elemento analizado.

Cada estadio se asocia a un conjunto representativo de actuaciones de reparación, de esta manera se puede vincular directamente con un coste económico unitario y un impacto ambiental unitario. Cada uno de los tres primeros estadios tienen asociado un coste económico e impacto ambiental diferente en relación con la reparación a realizar, mientras que el cuarto y último estadio se considera como un umbral límite, en el que la reparación deja de ser viable y la sustitución de la estructura es la única alternativa viable, tratándose de forma referencial a efectos de orden de magnitud.

Finalmente se introduce un análisis temporal orientativo de la transición entre estadios mediante el uso del modelo de corrosión de Li, este modelo servirá como referencia para estimar tiempos medios de evolución del deterioro. Este análisis no pretende predecir el comportamiento individual de una estructura en concreto, sino de proporcionar un marco temporal general que permita ilustrar las consecuencias económicas y ambientales asociadas al retraso en la intervención. La metodología se completa con la aplicación de las tablas desarrolladas a varios casos reales, permitiendo analizar de forma comparativa el incremento del coste económico y del impacto ambiental a medida que la estructura progresa de un estadio de degradación a otro.

3.3 Casos de estudio considerados

3.3.1 Origen de los casos de estudio

Los casos de estudio analizados en este trabajo proceden como ya se mencionó antes de dos contratos marco de ámbito estatal licitados por ADIF para la conservación y reparación de puentes ferroviarios de hormigón y fábrica, adjudicados a una empresa privada especializada en la rehabilitación de estructuras.

Ambas campañas engloban un amplio conjunto de estructuras ferroviarias distribuidas por la red gestionada por ADIF, incluyendo distintas tipologías estructurales y diferentes estados de conservación.

3.3.2 Tipología estructural y patología común

En el marco de las dos campañas se han intervenido en distintas estructuras de entre las que se incluyen puentes y pasos superiores de fábrica, tableros de hormigón armado con vigas convencionales, estructuras de hormigón pretensado, marcos prefabricados, losas de hormigón armado, puentes singulares y otras tipologías habituales en la red ferroviaria.

De este conjunto global de estructuras, se han identificado quince puentes y pasos inferiores cuya tipología estructural corresponde a tableros formados por vigas de sección tipo π de hormigón armado. Estas quince estructuras constituyen el conjunto completo de puentes de esta tipología incluidos en las dos campañas objeto de análisis.

Este criterio de selección garantiza la homogeneidad tipológica del conjunto de estudio y permite centrar el análisis en una única solución estructural representativa, evitando así hipótesis y variables adicionales asociadas a tipologías diferentes.

En cada uno de estos casos el elemento estructural de interés es el tablero, excluyéndose del análisis otros elementos como estribos, pilas o elementos accesorios.

Por otro lado, desde el punto de vista patológico, las quince estructuras presentan una problemática común asociada a los procesos de degradación por corrosión, que están directamente relacionados a la presencia de humedades, ennegrecidos, escurridos desde la plataforma hacia los voladizos, insuficiencia de recubrimientos, carbonatación del hormigón, desconchones en el recubrimiento y exposición a la intemperie de las armaduras con la pérdida de sección que le caracteriza. Esta recurrencia de mecanismos de deterioro permite identificar patrones de evolución del daño y relacionarlos con las actuaciones de reparación adoptadas.

3.3.3 Relación de estructuras analizadas

A continuación, se presenta una tabla resumen con la relación de las estructuras consideradas como casos de estudio en el presente trabajo. La tabla tiene por objeto sintetizar la información relevante de cada estructura desde el punto de vista tipológico y patológico, así como la documentación técnica disponible, constituyendo una base empírica a partir de la cual se desarrollan las tablas de costes, las métricas ambientales y la definición de estadios por degradación.

Nº	Denominación de la estructura	Línea ferroviaria	PK.	Tipología estructural	Nº vanos	Tipo de info. técnica disponible	Daños dominantes observados en vigas π	Armadura vista	Alcance estimado del daño (%)
1	Viaducto sobre el corredor del Jarama	Madrid - Alicante	46+100	Vigas π HA	3	Inspección y reparación	Desconchones, corrosión generalizada en intradós y juntas longitudinales	Localizada	12%
2	Puente sobre la carretera CT-34	Cartagena - Escobrerías	11+530	Viga π HA	1	Inspección	Desconchones extensos, corrosión avanzada, armadura expuesta	Frecuente	30%
3	Paso inferior	Cartagena - Escobrerías	11+990	Viga π HA	1	Inspección	Humedades continuas, escuñidos, desconchones leves	Puntual	1%
4	Paso inferior Acceso al Puerto	Cartagena - Escobrerías	12+180	Viga π HA	1	Inspección	Desconchones severos, corrosión visible en intradós	Frecuente	30%
5	Puente sobre el arroyo de la Aldehuela	Aranjuez-Utiel	100+160	Vigas π HA	10	Inspección y reparación	Saltados, corrosión localizada por escuñidos	Localizada	10%
6	Puente sobre el río Mayor	Aranjuez-Utiel	100+370	Vigas π HA	11	Inspección y reparación	Desconchones, corrosión en nervios y laterales	Localizada	10%
7	Paso inferior sobre la carretera N-420	Puertollano - Refinería	1+105	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Humedades, desconchones localizados	Localizada	15%
8	Paso inferior sobre camino Cañamares	Puertollano - Refinería	1+519	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Desconchones en nervios, cercos vistos, escuñidos y ennegrecidos	Localizada	13%
9	Paso inferior sobre camino Hoya Bótica	Puertollano - Refinería	3+034	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Humedades, saltados incipientes	Frecuente	22%
10	Paso inferior sobre la carretera CR-502	Puertollano - Refinería	3+075	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Corrosión generalizada, pérdida de sección	Generalizada	36%
11	Paso inferior arroyo Baranquillo	Puertollano - Refinería	4+354	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Corrosión avanzada	Frecuente	20%
12	Paso inferior sobre la carretera N-111A	Toralba-Soria	91+078	Viga π HA	1	Inspección y reparación	Daño por impacto + corrosión secundaria	Localizada	17%
13	Puente sobre el Río Corbones	Alcázar-Sevilla	528+518	Vigas π HA	1	Inspección y reparación	Desconchones, corrosión por carbonatación	Frecuente	21%
14	Puente Riera de Palau (Can Trias)	Zaragoza - Barcelona	331+767	Vigas π HA	3	Inspección y reparación	Corrosión en zonas puntuales	Puntual	1%
15	Puente sobre el río El Manol	Sagresa - Cerbere	244+062	Vigas π HA	8	Inspección	Desconchones, armadura vista localizada, corrosión en junta longitudinal entre vigas	Puntual	3%

La información recogida permite identificar patrones comunes de deterioro en vigas de sección tipo π y facilita la comparación entre distintos niveles de afección, manteniendo en todo momento un enfoque agregado y no individualizado de los casos analizados. En cuanto al alcance estimado del daño se ha cuantificado como un valor porcentual puntual, obtenido a partir de la relación entre la superficie efectivamente reparada por actuaciones asociadas a la corrosión (recomposición con mortero R4, pasivación de armaduras, etc.) y la superficie total del tablero, determinada a partir de mediciones globales como el chorro de limpieza o la aplicación de pintura anticarbonatación, corroborado con las dimensiones de estos elementos en planos.

3.4 Definición de tablas base de coste económico

La evaluación del impacto económico asociada a la degradación por corrosión en estructuras de hormigón armado se fundamenta, en el presente trabajo, en la definición de una tabla base de costes unitarios correspondientes a las actuaciones habituales de reparación y refuerzo aplicables a las vigas de sección tipo π . Esta tabla constituye la referencia económica a partir de la cual se determinará, en posteriores apartados, el coste asociado a cada uno de los estadios de degradación definidos.

3.4.1 Criterios generales de valoración económica

La valoración económica se realiza empleando como referencia la Base de Precios de Adif (BPA), en su edición vigente (07/02/2025) y al ser este un documento oficial utilizado por la administración para la estimación de costes en diversas actuaciones dentro del ámbito de las infraestructuras, se garantiza la coherencia, homogeneidad y actualidad de los precios adoptados.

Con el fin de facilitar la comparación eficaz entre diferentes niveles de afección, los costes se expresan en términos de euros por metro cuadrado ($\text{€}/\text{m}^2$) de superficie intervenida en la viga (además de que las unidades que intervienen por lo general en el ámbito de las reparaciones por corrosión vienen expresadas en esta unidad en la BPA). Esta unidad es práctica y funcional ya que permite relacionar de manera directa la extensión del daño con el impacto económico de su reparación, independientemente de la geométrica específica de cada estructura.

Otro criterio que condiciona en gran manera los precios que se obtienen de la BPA son las condiciones materiales y del entorno que ajustan el precio de cada unidad de obra. Estas situaciones contemplan si el trabajo se realizara en horario diurno o en horario nocturno y si el trabajo se debe realizar en banda de mantenimiento o no.

Para el objeto de este estudio, al realizar los trabajos de reparación por debajo de la cota del tablero y en la cara inferior de este, se supone que estos no coinciden ni afectan a las circulaciones ferroviarias. Por lo que se harán en horario diurno y sin necesidad de banda de mantenimiento.

Finalmente, los precios unitarios considerados incluyen los costes directos de ejecución (materiales, mano de obra y medios auxiliares), así como el porcentaje de costes indirectos incorporado de forma estándar en los descompuestos de la BPA, habitualmente fijado en un 6%.

En resumen:

- Se toma como referencia la base de precios de ADIF (BPA) en su edición vigente al momento de la redacción de este trabajo (07/02/2025).
- El coste económico de cada una de las unidades de reparación se expresa en términos de euros por metro cuadrado ($\text{€}/\text{m}^2$) para permitir una comparativa eficaz entre distintos estadios de degradación.
- Respecto a las condiciones materiales y entorno de los trabajos, se considera un escenario estándar donde los trabajos se realizan en horario diurno y sin necesidad de banda de mantenimiento.
- Los precios unitarios de la BPA incluyen costes directos y costes indirectos.

3.4.2 Selección de unidades de obra asociadas a la corrosión

Las unidades de obra incluidas en la tabla base que se muestra en el siguiente apartado se han seleccionado a partir de un análisis detallado de los informes de inspección y reparación correspondientes a un conjunto representativo de pasos inferiores y puentes ferroviarios gestionados por ADIF listados en el apartado “3.3 Casos de estudio considerados”, todos ellos con vigas de sección tipo π afectadas por procesos de corrosión.

Dentro de las actuaciones realizadas en estas estructuras, únicamente se han considerado aquellas actuaciones directamente relacionadas con la reparación de daños derivados de la corrosión de hormigón armado que son las siguientes, excluyendo así todas las partidas correspondientes a drenajes, sellado de juntas, elementos de seguridad o actuaciones motivadas por acciones accidentales o ajenas al propio fenómeno de la corrosión.

Con estos criterios las actuaciones resultantes son:

- Picado mecánico de superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte
- Chorro de superficie mediante proyección de árido
- Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras
- Recomposición de sección de hormigón con mortero clase R4
- Aplicación de inhibidor de corrosión
- Aplicación de pintura anticarbonatación
- Laminado de fibra de carbono

3.4.3 Procedencia y actualización de precios unitarios y unidades de obra

La Base de Precios de ADIF constituye la referencia principal para la valoración económica de las actuaciones consideradas en este trabajo. No obstante, durante el proceso de identificación de las unidades de obra asociadas a la reparación por daños de corrosión, se ha constatado que hay actuaciones que tienen ciertas particularidades.

Por un lado, la actuación de picado mecánico de la superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte y la aplicación de imprimación anticorrosiva de armaduras empleada en la reparación de los puentes y pasos inferiores no se encuentran definidas como partidas independientes en la BPA.

Y por otro lado la actuación de la colocación del laminado de fibra de carbono esta descompuesta en una unidad que se mide en metros lineales y otra unidad que se mide en metros cuadrados. Sin embargo, como se estableció previamente hay que expresar esta actuación en una única unidad cuya unidad de medición son los m².

Debido a estas particularidades se procede a especificar el contenido de cada una de estas actuaciones previo al montaje de todas estas en la tabla de precios del siguiente apartado.

- **Picado mecánico de superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte**

Esta actuación no se encuentra definida como una partida independiente en la BPA, su valoración se ha realizado a partir del descompuesto incluido en el anejo de justificación de precios de un proyecto constructivo de ADIF relativo a la reparación de estructuras de hormigón. Dicho descompuesto recoge de forma detallada los recursos necesarios para la ejecución de la unidad, incluyendo mano de obra, maquinaria y medios auxiliares.

Con el objetivo de garantizar la coherencia y actualidad del análisis económico, los precios unitarios de cada componente del descompuesto original se han actualizado empleando los valores vigentes de la BPA, manteniéndose los rendimientos y consumos originalmente definidos. De este modo, se obtiene un coste unitario actualizado y compatible con la BPA, que se adopta como referencia para la elaboración de las tablas base de costes del presente estudio.

1. Base de Precios Tipo para los Proyectos de Mantenimiento de Plataforma 2018

Codigo BPMP-PTIVI 2018	Unidad	Descripcion	Cantidad	Precio	Subtotal
MOC0000500	h	Peon	0.7150	19.60	14.01
MOC0000400	h	Peon especialista	0.7150	19.97	14.28
MQ0100W002	h	Grupo electrogeno de 40kva	0.3900	4.80	1.87
MQ1603W004	h	Equipo de picado	0.7150	4.87	3.48

Mano de obra	28.29
Maquinaria	5.35
6% Costes indirectos	2.02
Total partida	35.67 €

2. Base de Precios de ADIF 2025 (Precio actualizado)

Codigo BPA 2025	Unidad	Descripcion	Cantidad	Precio	Subtotal
MOC0000500	h	Peon	0.7150	21.17	15.14
MOC0000400	h	Peon especialista	0.7150	21.44	15.33
MQ0100A015	h	Grupo electrogeno de 40kva	0.3900	13.25	5.17
MQ03000010	h	Equipo de picado	0.7150	2.13	1.52

Mano de obra	30.47
Maquinaria	6.69
6% Costes indirectos	2.23
Total partida	39.39 €

Con el precio en €/m² se tendría finalmente lo siguiente:

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Picado mecánico de superficie de hormigón	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	m ²	-	39.39

- **Chorro de superficie mediante proyección de árido**

El coste unitario se valora directamente a partir de la Base de Precios de ADIF, donde se encuentra definida como una partida específica. El coste unitario se adopta sin necesidad de descomposición adicional.

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Chorro de armaduras	Chorreado de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA070\$	14.85

- **Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras**

Al igual que con la unidad de picado y saneo de la superficie, esta actuación no se encuentra definida como una partida independiente en la BPA, su valoración se ha realizado a partir del descompuesto incluido en el anejo de justificación de precios de un proyecto constructivo de ADIF relativo a la reparación de estructuras de hormigón. Dicho descompuesto recoge de forma detallada los recursos necesarios para la ejecución de la unidad, incluyendo mano de obra, maquinaria y medios auxiliares.

Con el objetivo de garantizar la coherencia y actualidad del análisis económico, los precios unitarios de cada componente del descompuesto original se han actualizado empleando los valores vigentes de la BPA, manteniéndose los rendimientos y consumos originalmente definidos. De este modo, se obtiene un coste unitario actualizado y compatible con la BPA, que se adopta como referencia para la elaboración de las tablas base de costes del presente estudio.

1. Base de Precios Tipo para los Proyectos de Mantenimiento de Plataforma 2018

Codigo BPMP-PTIVI 2018	Unidad	Descripcion	Cantidad	Precio	Subtotal
MOC0000100	h	Capataz	0.0300	21.32	0.64
MOC0000200	h	Oficial 1A	0.3000	20.87	6.26
MN0114W003	kg	Puente union, pasivador epoxi	0.7000	11.87	8.31

Mano de obra	6.90
Material	8.31
6% Costes indirectos	0.91
Total partida	16.12 €

2. Base de Precios de ADIF 2025 (Precio actualizado)

Codigo BPA 2025	Unidad	Descripcion	Cantidad	Precio	Subtotal
MOC0000100	h	Capataz	0.0300	23.36	0.70
MOC0000200	h	Oficial 1A	0.3000	22.87	6.86
MN01092038	kg	Puente union, pasivador epoxi	0.7000	6.24	4.37

Mano de obra	7.56
Material	4.37
6% Costes indirectos	0.72
Total partida	12.65 €

Con el precio en €/m² se tendría finalmente lo siguiente:

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	m ²	-	12.65

- **Recomposición de sección de hormigón con mortero clase R4**

El coste unitario se valora directamente a partir de la Base de Precios de ADIF, donde se encuentra definida como una partida específica. El coste unitario se adopta sin necesidad de descomposición adicional.

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Reconstrucción con mortero R4	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m ² por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm ² , y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA140\$	129.77

- **Aplicación de inhibidor de corrosión**

El coste unitario se valora directamente a partir de la Base de Precios de ADIF, donde se encuentra definida como una partida específica. El coste unitario se adopta sin necesidad de descomposición adicional.

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Inhibidor de corrosión	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasiva la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm ² , no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m ² , previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA180\$	48.86

- **Aplicación de pintura anticarbonatación**

El coste unitario se valora directamente a partir de la Base de Precios de ADIF, donde se encuentra definida como una partida específica. El coste unitario se adopta sin necesidad de descomposición adicional.

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Pintura anticarbonatación	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m ² en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA190\$	13.7

- **Laminado de fibra de carbono**

1. **Sistema y disposición de refuerzo estructural mediante sistemas de fibra de carbono aplicados a vigas π**

Hay una diversidad de soluciones al momento de disponer laminado de fibra de carbono sobre un elemento estructural. En el caso de las vigas π el sistema más común implica un sistema de refuerzo mediante fibra de carbono adherida con resina epoxi, combinando dos mecanismos resistentes diferenciados.

Por un lado, se disponen de laminados de fibra de carbono unidireccionales colocados longitudinalmente en la parte inferior de la viga que estarían destinados a compensar la pérdida de capacidad a flexión asociada a la corrosión de la armadura longitudinal. Por lo general, por cada fila se suele superponer dos laminados ya que es bastante habitual que la demanda resistente no quede satisfecha por una sola capa de CFRP y que a la vez el ancho de la viga no sea lo suficientemente significativo como para disponer una sola capa de laminado a lo largo de toda la viga.

Y por otro lado se colocan mallas o tejidos de fibra de carbono colocados de manera transversal al laminado de fibra de carbono longitudinal, estas mallas están orientadas a mejorar la resistencia frente a esfuerzos cortantes que se ha perdido debido a la pérdida de sección de los cercos debido a la acción de la corrosión.

Esta solución se ilustra en el siguiente esquema:

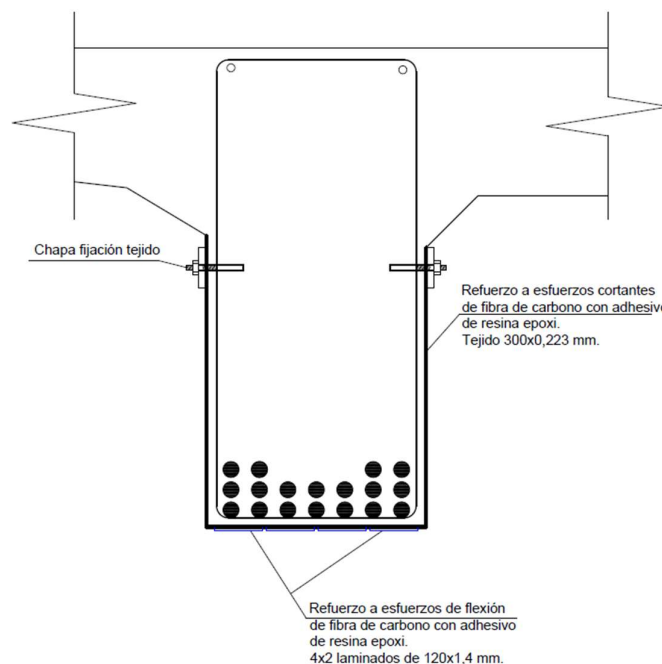


Figura 42 Esquema donde se muestran los dos mecanismos resistentes.

En el esquema previo se puede observar cómo se tiene por un lado las láminas de CFRP de manera longitudinal dispuestas en 4 filas, donde cada fila tiene superpuestas dos laminas. Y por otro lado se tiene una malla de CFRP de manera transversal para soportar los esfuerzos cortantes, esta malla envuelve el nervio de tal manera que cubre las dos caras laterales del mismo, así como la cara inferior de este.

2. Unidades de obra asociadas al refuerzo con CFRP

Desde el punto de vista de la valoración económica, la solución de refuerzo estructural considerada se descompone en dos unidades de obra diferenciadas de acuerdo con la BPA:

- Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm², módulo elástico >2000 N/mm² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4. **Medida en metros lineales**
- Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m², de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm², módulo elástico >2000 N/mm² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4. **Medida en metros cuadrados.**

Para homogeneizar la valoración económica del conjunto de actuaciones y expresar los costes en €/m² de superficie de elemento reforzado, resulta necesario convertir la medición de los laminados longitudinales de metros lineales a metros cuadrados equivalentes.

3. Conversión de metros lineales de laminado a metros cuadrados

La conversión se realiza considerando la geometría y disposición real del refuerzo ejecutado, siendo esta una geometría y disposición habitual en esta tipología. En el caso analizado, sobre una viga de 0.55m de ancho se disponen cuatro filas de laminados, con dos bandas superpuestas por cada fila, lo que implica la colocación de ocho laminados longitudinales a lo largo de la vía.

De esta manera, por cada metro lineal de viga reforzada se colocan ocho metros lineales de laminado y la superficie de viga asociada a un metro lineal de refuerzo es:

$$1.00 \text{ m (longitud)} \times 0.55 \text{ m (ancho)} = 0.55 \text{ m}^2$$

Por tanto, la relación entre el laminado y superficie reforzada es:

$$\frac{8 \text{ ml de laminado}}{0.55 \text{ m}^2} = 14.55 \text{ ml/m}^2$$

Esto implica que, para reforzar 1 m² de superficie de viga, se requieren aproximadamente 14.55 metros lineales de laminado de fibra de carbono unidireccional.

4. Cálculo del coste unitario del refuerzo con CFRP: Laminado + Hoja de fibra

Para este trabajo se define que la cara inferior del nervio de la viga dispondrá tanto de refuerzo con laminado de fibra de carbono unidireccional como de hoja de fibra de carbono unidireccional de manera simultánea, implicando una necesidad de refuerzo de armadura longitudinal y transversal. Por lo que la cara inferior del nervio estará compuesta por una suma de dos precios.

A partir de la BPA, el coste unitario del laminado de fibra de carbono longitudinal es de 97.58 €/ml. Aplicando la conversión anterior, el coste equivalente en €/m² resulta:

$$14.55 \frac{\text{ml}}{\text{m}^2} \times 97.58 \frac{\text{€}}{\text{ml}} = 1.419,79 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$$

Por otra parte, la partida correspondiente a la hoja o malla de fibra de carbono para refuerzo a cortante, medida directamente en m², tiene un coste unitario de 138.38 €/m².

Finalmente, el coste total del refuerzo estructural con laminado y hoja de fibra expresado en €/m² de superficie reforzada, se obtiene como la suma de ambas contribuciones:

$$\text{Coste CFRP}_{\text{laminado+hoja de fibra}} = 1.419,79 + 138,38 = 1.558,17 \text{ €/m}^2$$

5. Cálculo del coste unitario del refuerzo con CFRP: Solo Hoja de fibra

Para este trabajo se define que las caras laterales del nervio de la viga únicamente requerirán hoja de fibra de carbono unidireccional, implicando una necesidad de refuerzo para la armadura transversal. Debido a esto, las caras laterales estarán compuestas únicamente de un precio.

$$\text{Coste CFRP}_{\text{hoja de fibra}} = 138,38 \text{ €/m}^2$$

Después de estas consideraciones la tabla de precios correspondiente a esta unidad quedaría de la siguiente manera:

Actuación	Descripción BPA	Unidad	Código BPA	Precio unitario €/m ²
Refuerzo mediante fibra de carbono: Laminado y Hoja de fibra	Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo. Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA160\$ + OGA170\$	1558.17
Refuerzo mediante fibra de carbono: Solo Hoja de fibra	Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares,	m ²	OGA170\$	138.38

Es importante recalcar que la disposición que se plantea en base a la figura 52, compuesta por laminado y hoja de fibra en la cara inferior del nervio y únicamente hoja de fibra en las caras laterales del nervio, es una disposición común. Sin embargo, dependiendo el estado de deterioro específico de cada estructura puede que únicamente sea necesario disponer de laminado unidireccional en la cara inferior del nervio o que por el contrario sea necesario disponer de laminado unidireccional y hoja de fibra en las tres caras del nervio. Esto se deberá evaluar de manera específica una vez se intervenga en la estructura, pero a efectos de toma de decisiones para el administrador la disposición que se plantea es razonable.

3.4.3 Tablas base de costes unitarios

Como resultado final, se define una tabla base de costes unitarios, en la que se recogen las principales actuaciones tipo empleadas en la reparación de estos elementos de hormigón armado afectados por la corrosión. Para cada actuación se indica su descripción, unidad de medición, fuente de referencia y coste unitario expresado en €/m².

Nº	Actuación	Descripción	Unidad	Código (BPA ADIF)	Precio unitario (€/m ²)
1	Picado mecánico de superficie de hormigón	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	m ²	Descompuesto actualizado BPA	39.39
2	Chorro de armaduras	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA070\$	14.85
3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	m ²	Descompuesto actualizado BPA	12.65
4	Reconstrucción con mortero R4	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m ² por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm ² , y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA140\$	129.77
5	Inhibidor de corrosión	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasa la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm ² , no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m ² , previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA180\$	48.86

6	Pintura anticarbonatación	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m ² en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA190\$	13.70
7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: Laminado y Hoja de fibra	Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo. Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA160\$ + OGA170\$	1558.17
7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: Solo Hoja de fibra	Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA170\$	138.38

*Los precios unitarios se expresan en euros por metro cuadrado de superficie del elemento estructural intervenido. En el caso del refuerzo con fibra de carbono, los costes correspondientes a los laminados están medidos originalmente en metros lineales y han sido convertidos a metros cuadrados según la disposición convencional de este tipo de refuerzo en esta tipología estructural (vigas π).

La tabla definida constituye una parte fundamental para la posterior construcción de los distintos estadios de degradación, permitiendo combinar las actuaciones necesarias en cada caso y estimar de forma objetiva el impacto económico asociado a la evolución del daño.

3.4.4 Alcance y limitaciones de la valoración económica

La valoración económica desarrollada en este trabajo tiene un carácter comparativo y orientativo, y no pretende sustituir a un presupuesto de ejecución material ni a un proyecto constructivo. No se incluyen costes asociados a afecciones a la explotación ferroviaria, desvíos de tráfico, gastos generales de empresa ni beneficio industrial, dado que su consideración requeriría hipótesis adicionales ajenas al objeto del estudio.

Mediante este enfoque nos podemos centrar en el análisis en la relación directa entre el grado de degradación por corrosión y el coste económico de su reparación, facilitando la comparación entre distintos estadios de deterioro y reforzando el carácter práctico de la herramienta propuesta.

3.5 Definición de tablas base de impacto ambiental

3.5.1 Criterios generales de valoración ambiental

La evaluación del impacto ambiental asociada a las actuaciones de reparación por corrosión se plantea en el presente trabajo con un enfoque aplicado y comparativo, que se alinea con los objetivos del TFM y con la práctica habitual en la conservación de infraestructuras existentes.

El propósito principal de este no es cuantificar el impacto ambiental a nivel global de una estructura a lo largo de todo su ciclo de vida (análisis ACV), sino analizar como varía el impacto ambiental de las intervenciones necesarias en función del estado de degradación alcanzado como consecuencia del retraso en la intervención.

La métrica ambiental que se adopta es el Potencial de Calentamiento Global (PCG), expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalente ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$), por tratarse del indicador más ampliamente utilizado en estudios de esta índole dentro del sector de la construcción y conservación, así como el más disponible en Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) mencionadas previamente en el estado del conocimiento y también en bases de datos técnicas. Además, esta métrica permite hacer una comparación directa entre soluciones de reparación y refuerzo desde un punto de vista ambiental.

Como en el apartado 3.4 la unidad funcional empleada en este análisis es el metro cuadrado (m^2) de superficie del elemento estructural intervenido. Esta elección facilita la posterior integración de los resultados en los distintos estadios de degradación definidos y permite establecer comparaciones homogéneas entre actuaciones de distinta naturaleza y alcance.

Esta evaluación se basa en identificar los impactos asociados a los materiales empleados y al consumo energético de la maquinaria utilizada durante la ejecución de las actuaciones, a partir de los descompuestos de las unidades de obra definidos en la Base de Precios de ADIF. El impacto ambiental de cada unidad de obra se obtiene mediante la suma de los impactos parciales de sus distintos componentes, expresándose finalmente en $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$ por m^2 .

El enfoque planteado permite disponer de valores ambientales trazables, coherentes y comparables entre sí, adecuados para analizar la evolución del impacto ambiental de las reparaciones a medida que progresa el deterioro por corrosión.

3.5.2 Alcance y límites del análisis ambiental

El análisis ambiental desarrollado en el presente trabajo se ha definido de forma deliberadamente acotada, con el fin de garantizar la coherencia metodológica, la trazabilidad de los datos empleados y la adecuación del estudio a los objetivos planteados. En este sentido, no se aborda un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo, sino una evaluación ambiental centrada en las fases directamente relacionadas con la ejecución de las actuaciones de reparación por corrosión.

Debido a esto el análisis incluye únicamente los impactos ambientales asociados a:

- La producción de los materiales de reparación y refuerzo empleados.
- El consumo energético de la maquinaria utilizada durante la ejecución de las actuaciones en obra.

Ambos expresados mediante el indicador de Potencial de Calentamiento Global (kg CO₂ eq) y referidos a la unidad funcional adoptada (m² de superficie intervenida).

Por el contrario, quedan expresamente excluidas del análisis las siguientes fases y elementos:

- La fabricación, mantenimiento y fin de vida de la maquinaria empleada.
- El transporte de materiales y equipos hasta la obra.
- La gestión ambiental de los residuos generados.
- Los impactos indirectos asociados a afecciones al tráfico ferroviario a viario.

Estas exclusiones se justifican porque las fases y elementos no considerados presentan por lo general una variación limitada entre los distintos escenarios de intervención que se definen en el siguiente apartado, por lo que su inclusión no incrementaría de forma significativa la capacidad del modelo para discriminar entre estadios de degradación asociados al retraso por la actuación. En particular, aspectos como el transporte de materiales y equipos o la fabricación de determinados medios auxiliares tienen a ser similares con independencia del momento de intervención, mientras que el objetivo del presente estudio es analizar el incremento del impacto ambiental directamente atribuible a la mayor entidad de las reparaciones necesarias a medida que progresa la corrosión.

Adicionalmente, la incorporación de estas fases requeriría la adopción de hipótesis y criterios de reparto que, si bien podrían abordarse en estudios específicos de mayor alcance, no aportarían una mejora proporcional en la certidumbre ni en la comparabilidad de los resultados obtenidos dentro del marco y objetivos definidos para este trabajo.

Asimismo, no se incluyen los medios de acceso y protección colectiva, tales como andamios o plataformas elevadoras móviles de personal (PEMP). Estos medios no forman parte de los descompuestos de las unidades de obra de la Base de Precios de ADIF, ya que este las

considera como unidades de obra aparte. Esto se debe a que la utilización de estos viene condicionada por las situaciones específicas de la obra y dificultad de acceso a los elementos en los que haya que intervenir dentro de esta y no está directamente relacionada a la reparación de un elemento estructural en concreto, ya que este puede requerir o no medios de acceso. En consecuencia, su inclusión no agregaría valor al momento de discriminar y valorar entre escenarios de intervención temprana o tardía, que constituye el objetivo principal del presente estudio.

En base a lo anterior, también es importante recalcar que si bien **la necesidad de medios auxiliares en obra tiene un coste económico importante dentro de esta, el uso o no de un medio auxiliar no varía de manera significativa en función del grado de la corrosión.**

Si un elemento presenta degradación por corrosión y se determina que se necesita disponer de un medio auxiliar para repararlo, el hecho de que este tenga mayor o menor afección por corrosión hace que haya una variación en el tiempo de uso de un medio, pero no implica el uso o no de dicho elemento. Por lo que si bien varía el coste económico, no lo hace de manera significativa.

En cuanto a la mano de obra, no se le asigna de forma directa un impacto ambiental específico, ya que ya viene asociado a la ejecución de las actuaciones de manera indirecta representado a través del consumo energético de la maquinaria y de la producción de los materiales empleados.

Finalmente, dentro de las etapas del ciclo de vida de los productos, maquinaria y equipos se debe tomar en cuenta que hay módulos que son habituales y están presentes en la mayoría de DAP, sin embargo, hay otros módulos que no son habituales o bien están definidos bajo circunstancias específicas. Debido a esto y para facilitar la comparación entre estadios y productos, así como para tener datos homogéneos y trazables los módulos que se incluyen de la etapa de ciclo de vida de los productos son:

- Etapa de Producto A1-A3: Esta etapa incluye los siguientes módulos enumerados a continuación; Módulo A1 Extracción y procesado de materias primas, Módulo A2 Transporte de las materias primas a la planta de producción y el Módulo A3 Fabricación.

Por otro lado, los módulos que están excluidos de este análisis son:

- Etapa de construcción A4-A5
- Etapa de uso: B1-B7
- Etapa de fin de vida: C1-C4

El alcance definido permite desarrollar un análisis ambiental coherente con la práctica habitual en la conservación de infraestructuras, orientado a la comparación relativa del impacto ambiental de las distintas actuaciones y estadios de degradación, sin incurrir en realizar un ACV completo.

3.5.3 Metodología de cálculo del impacto ambiental

El cálculo del impacto ambiental de las distintas actuaciones de reparación y refuerzo se realiza a partir de una metodología basada en el descompuesto de las unidades de obra definido en la Base de Precios de ADIF, con el objetivo de obtener valores de huella de carbono expresados en kg CO₂ equivalente por metro cuadrado (kg CO₂ eq/m²) de superficie intervenida.

Para cada una de las unidades de obra consideradas en el estudio, el procedimiento seguido consta de las siguientes etapas:

- **Identificación del descompuesto de la unidad de obra**
Como primer paso se identifica la unidad de obra correspondiente en la BPA y se analiza su descompuesto, en el que se detallan los materiales empleados, la maquinaria y equipos utilizados y la mano de obra necesaria para su ejecución.
Este descompuesto constituye la base objetiva y trazable sobre la que se desarrolla el cálculo ambiental, garantizando la coherencia con la valoración económica presentada en el apartado anterior.
- **Clasificación de los componentes según su contribución ambiental**
Los elementos del descompuesto se clasifican en dos categorías:
Materiales, tales como morteros, resinas, fibras de carbono, pinturas, inhibidores, etc.
Maquinaria y equipos, incluyendo herramientas eléctricas, equipos de proyección, grupos electrógenos, etc.
De acuerdo con los criterios establecidos, únicamente se asigna impacto ambiental directo a los materiales y al consumo energético de la maquinaria, quedando excluida la mano de obra.
- **Asignación de factores de emisión**
A cada material incluido en el descompuesto se le asigna un factor de emisión de CO₂ equivalente, obtenido preferiblemente de Declaraciones Ambientales de Producto (siempre que estén disponibles), documentación técnica de fabricantes o bibliografía técnica y bases de datos reconocidas en el ámbito de la construcción.
En el caso de la maquinaria y los equipos, el impacto ambiental se estima a partir de su consumo energético durante el tiempo de uso indicado en el descompuesto, aplicando factores de emisión asociados al consumo energético o al uso de combustibles, según corresponda.
- **Cálculo del impacto ambiental parcial**
Una vez definidos los factores de emisión, se calcula el impacto ambiental parcial de cada componente del descompuesto mediante el producto entre la cantidad de material o tiempo de uso del equipo y su correspondiente factor de emisión.
Este cálculo permite obtener el impacto ambiental individualizado de cada línea del descompuesto, expresado en kg de CO₂ eq.

- **Obtención del impacto ambiental total de la unidad de obra**

El impacto ambiental total de cada unidad de obra se obtiene mediante la suma de los impactos parciales de todos los materiales y equipos incluidos en su descompuesto. El resultado final se expresa en kg de CO₂ eq por unidad de obra, que posteriormente se normaliza respecto a la unidad funcional adoptada (m² de superficie intervenida).

Este valor constituye el dato base que se empleara en la elaboración de las tablas de impacto ambiental y posteriormente en la definición de los distintos estadios de degradación.

- **Representación y trazabilidad de los resultados**

Los cálculos detallados del impacto ambiental se presentan de forma sintética en el cuerpo principal del documento, mientras que los descompuestos completos y los cálculos intermedios se incluyen en el anexo correspondiente garantizando la trazabilidad del proceso y la posibilidad de verificación de los resultados obtenidos.

La metodología descrita permite obtener valores ambientales coherentes, comparables y directamente vinculados a la magnitud de las actuaciones necesarias en cada estadio de degradación, cumpliendo así con los objetivos del presente trabajo.

3.5.4 Procedencia de factores de emisión

La estimación del impacto ambiental asociado a las distintas unidades de obra se ha realizado a partir de los descompuestos que ofrece la BPA de ADIF, identificando para cada unidad los flujos relevantes desde el punto de vista ambiental. Estos flujos se corresponden con los materiales consumidos y, en determinados casos con el consumo energético asociado a equipos de obra, expresándose finalmente el impacto en términos de Potencial de Calentamiento Global (PCG), medido en kg de CO₂ equivalente por unidad funcional (kg CO₂ eq/m²).

- **Mano de obra**

Las horas de mano de obra incluidas en los descompuestos de la BPA como el capataz, oficial, peón, peón especialista y ayudante. No se han considerado como un flujo ambiental independiente en el cálculo del impacto ambiental.

La justificación de esta decisión se basa en que la actividad de la mano de obra se materializa a través del uso de herramientas, maquinaria y aplicación de materiales, de modo que su contribución ambiental queda implícitamente recogida en el impacto asociado al consumo energético de los equipos y fabricación de los materiales empleados.

- **Materiales de construcción y productos de reparación**

Este apartado constituye el principal contribuyente al impacto ambiental en la mayoría de las unidades analizadas. Para cada uno de ellos se ha adoptado un factor de emisión específico, priorizando siempre que ha sido posible el uso de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) conforme a la norma UNE-EN ISO 14025.

En particular, se han considerado los siguientes materiales y criterios de valoración:

1. **Mortero estructural de reparación clase R4:** Se ha adoptado un factor de emisión representativo obtenido a partir de DAP de morteros R4 disponibles en el mercado, expresado en kg CO₂ eq/kg de producto.
2. **Pasivadores e imprimaciones anticorrosivas:** Se han utilizado factores de emisión procedentes de DAP de productos equivalentes, expresado en kg CO₂ eq/kg de producto.
3. **Inhibidores de corrosión:** El impacto ambiental se ha calculado a partir de DAP específicas de inhibidores comerciales, empleando factores en kg CO₂ eq/kg o kg CO₂ eq/L según la información disponible.
4. **Pinturas anticarbonatación:** Se han empleado factores de emisión procedentes de DAP de pinturas específicas para paramentos de hormigón, expresados en kg CO₂ eq/kg, adaptados al consumo por m² indicado en la BPA.
5. **Árido de cuarzo para chorreado:** Se ha considerado un factor de emisión energético procedente de literatura técnica y bases de datos de ACV del sector de la construcción, expresado en kg CO₂ eq/kg.
6. **Refuerzos con fibra de carbono (CFRP):** Se han utilizado factores de emisión procedentes de literatura técnica y DAP disponibles para laminados y tejidos de fibra de carbono, así como para las resinas epoxi asociadas, expresados en kg CO₂ eq/kg o kg CO₂ eq/m² según el producto.

Cuando un producto genérico de la BPA no dispone de una DAP específica se considera un producto representativo en el mercado actual, justificando su equivalencia técnica y funcional.

- **Equipos y consumo energético**

En relación con la maquinaria incluida en los descompuestos de las unidades de obra, se ha realizado una diferenciación entre equipos de consumo energético relevante y equipos auxiliares ligeros.

Los equipos con consumo energético dominante, como los grupos electrógenos y los equipos de chorro de arena, han sido considerados de manera explícita en el cálculo ambiental, estimando su impacto a partir del consumo de combustible y los correspondientes factores de emisión, al tratarse de equipos con una contribución significativa y fácilmente trazable.

En aquellas unidades de obra en las que aparece explícitamente el uso de grupos electrógenos, el impacto ambiental asociado a estos se ha estimado a partir del consumo de combustible. Se asume un consumo típico de gasóleo por hora de funcionamiento del aparato en función a la potencia nominal del mismo y posteriormente se aplica un factor de emisión del gasóleo, expresado en kg CO₂ eq/L, procedente de fuentes reconocidas y literatura técnica.

Por otro lado, los equipos auxiliares de pequeño tamaño (martillos picadores, lijadoras, aspiradores, batidores eléctricos, etc.) no se modelizan de forma individual, esta decisión se fundamenta en base a dos premisas.

En primer lugar, el impacto ambiental asociado a estos equipos es secundario frente al impacto derivado de los materiales de reparación y refuerzo y frente a los equipos auxiliares de gran tamaño, por lo que su consideración no alteraría de forma significativa la comparación entre distintos estadios de degradación. Y en segundo lugar, la BPA no proporciona información suficiente sobre el consumo energético real (potencia efectiva, régimen de uso o consumo kWh), lo que obliga a introducir hipótesis adicionales de elevada variabilidad.

- **Exclusiones y coherencia metodológica**

No se han incluido en el cálculo ambiental los medios de acceso (andamios, plataformas elevadoras móviles de personas), ni el transporte de materiales y equipos hasta la obra, al tratarse de elementos comunes al conjunto de la intervención y cuya variación entre estadios de degradación no resulta significativa. Su inclusión no mejoraría la capacidad del modelo para evaluar el incremento relativo del impacto ambiental asociado al retraso de la intervención.

3.5.5 Ejemplo de cálculo del impacto ambiental de una unidad de obra

En este apartado se procede a realizar el cálculo del impacto ambiental de una de las siete unidades de obra asociadas a la reparación de la estructura debido al proceso de la corrosión. Se incluye el cálculo de una de estas unidades por su valor ilustrativo, el cálculo detallado del resto de unidades, de carácter análogo y repetitivo, se incorpora en el Anexo I para preservar la claridad expositiva sin perder trazabilidad.

En base al procedimiento descrito en los apartados 3.5.1 a 3.5.4, se desarrolla un ejemplo completo de cálculo del Potencial de Calentamiento Global (PCG), expresado como kg CO₂ eq/m², aplicado a una unidad real de la BPA de ADIF:

- Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m² por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm², y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.

La BPA define esta unidad de obra por m² y para reconstrucciones con un espesor de hasta 4cm, es decir, un rango de aplicación. Para poder asignar un impacto ambiental unitario único (kg CO₂ eq/m²) se debe fijar un espesor representativo.

A efectos de este trabajo, se utilizará como valor el espesor máximo para evitar infravalorar la huella ambiental de la reconstrucción cuando el saneo alcanza profundidades relevantes. Además, el producto seleccionado es apto para aplicaciones en una sola capa de entre 3 y 40mm, siendo coherente con el límite superior de 4cm adoptado.

a) Descompuesto BPA

En esta unidad de obra en concreto, el descompuesto es el siguiente:

Descripción	Cantidad	Unidad
Capataz	0.061	h
Oficial 1A	0.610	h
Mortero estructural clase R4	76.000	kg

De acuerdo con las premisas descritas en apartados anteriores solo se contabiliza la categoría de materiales, ya que para esta unidad no existe un consumo explícito de maquinaria/equipos imputable al m² dentro del enfoque adoptado.

b) Declaración Ambiental de Producto (DAP)

A efectos de este cálculo se utiliza la DAP de un mortero de reparación estructural clase R4 de Mapei, un fabricante presente en España que mide las emisiones de CO₂ de sus productos en el mercado. En concreto se usa la DAP de acuerdo con las normas ISO 14025:2006 y EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 del mortero de reparación "PLANITOP RASA & RIPARA R4 ZERO". (MAPEI, 2025)

Indicator	Unit	A1 - A3	A4	A5	C1	C2	C3	C4	D
GWP _{TOTAL}	(kg CO ₂ eq.)	2,88E-01	6,69E-02	3,11E-02	1,95E-03	8,92E-03	1,98E-03	4,85E-03	-1,34E-02
GWP _{Fossil}	(kg CO ₂ eq.)	3,06E-01	6,30E-02	1,12E-02	1,93E-03	8,41E-03	1,94E-03	4,65E-03	-1,33E-02
GWP _{Biogenic}	(kg CO ₂ eq.)	-1,86E-02	2,81E-03	1,99E-02	1,74E-05	3,74E-04	6,60E-06	1,70E-04	-6,42E-06
GWP _{LULUC}	(kg CO ₂ eq.)	5,31E-04	1,03E-03	8,26E-06	2,94E-07	1,38E-04	2,63E-05	2,79E-05	-2,09E-05
ODP	(kg CFC 11 eq.)	8,38E-04	8,12E-05	9,00E-06	3,74E-06	1,11E-05	9,72E-06	3,30E-05	-1,43E-05
AP	(mol H ⁺ eq.)	4,07E-10	9,05E-15	2,94E-14	4,38E-14	1,21E-15	3,51E-15	1,25E-14	-3,54E-14
EP _{FRESHWATER}	(kg P eq.)	5,31E-06	2,62E-07	1,08E-08	8,02E-09	3,50E-08	7,56E-09	1,06E-08	-1,11E-08
EP _{MARINE}	(kg N eq.)	2,42E-04	2,91E-05	3,03E-06	9,33E-07	4,00E-06	4,48E-06	8,50E-06	-5,89E-06
EP _{TERRESTRIAL}	(mol N eq.)	2,80E-03	3,47E-04	3,39E-05	9,76E-06	4,77E-05	4,95E-05	9,36E-05	-6,49E-05
POCP	(kg NMVOC eq.)	2,60E-04	8,11E-05	8,08E-06	2,47E-06	1,10E-05	1,24E-05	2,60E-05	-1,54E-05
ADP _{MINERAL&METALS*}	(kg Sb eq.)	5,70E-03	5,35E-09	2,89E-10	3,62E-10	7,13E-10	2,04E-09	3,01E-10	-6,86E-10
ADP _{Fossil*}	(MJ)	1,95E00	8,09E-01	3,70E-02	4,06E-02	1,08E-01	3,64E-02	6,13E-02	-2,12E-01
WDP*	(m ³ world eq.)	3,54E-02	9,51E-04	9,27E-03	5,35E-04	1,27E-04	3,72E-04	5,32E-04	-3,22E-04

Tabla 12 Potencial de Calentamiento Global para el Planitop Rasa & Ripara R4 Zero (MAPEI, 2025)

c) Factor de emisión del mortero en base a la DAP

En base a la DAP del mortero seleccionado donde la EPD define como unidad declarada 1kg de producto (incluyendo embalaje) se utiliza el indicador GWP_{TOTAL} en los módulos A1-A3.

$$PCG_{R4} = 2.88 \times 10^{-1} \frac{kg \text{ CO}_2 eq}{kg} = 0,288 \frac{kg \text{ CO}_2 eq}{kg}$$

Tal y como se mencionó en los apartados previos, si bien los módulos A4 y A5 ayudarían a tener un análisis más cercano a lo que sería un ACV con un alcance más

representativo. Estos valores se excluyen ya que estos módulos dependen de un escenario en específico (distancias, tipo de camión, ubicación de la planta, organización de la obra, mermas reales, energía de equipos, etc.)

Y por otro lado no todas las fichas DAP declaran los módulos A4 y A5, si posteriormente el objetivo es comparar distintos escenarios y unidades de obra es coherente excluir estos módulos ya que puede darse la situación de que otros productos no tengan estos módulos y por lo tanto no se esté haciendo una comparación coherente.

d) Cuantificación del consumo de mortero

Para el consumo se toma el valor declarado en la ficha técnica del producto que establece que tiene un consumo de 17 kg/m² por cm. de espesor. (MAPEI, 2025)

Por lo tanto, para un espesor representativo de 4cm se tiene:

$$C_{R4} = 17 \frac{kg}{m^2 * cm} * 4 cm = 68 \frac{kg}{m^2}$$

Aunque la BPA pueda proporcionar en la unidad consumos ligeramente distintos (76 kg en el descompuesto), a efectos de este trabajo para mantener una coherencia entre consumo y factor de emisión. Se adopta el consumo del fabricante asociado al producto cuya DAP se emplea.

e) Cálculo del impacto ambiental unitario de la unidad de obra (kg CO₂ eq/m²)

En este caso al existir un único material, mortero clase R4, el Potencial de Calentamiento Global será:

$$PCG_{Total} = PCG_{R4} * C_{R4} = 0,288 * 68 = 19.58 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

El cálculo anterior se incluye como ejemplo completo y trazable de aplicación de una metodología definida a partir del consumo del producto (en este caso mortero R4) y del factor de emisión obtenido de su DAP en el módulo A1-A3, se obtiene el impacto unitario en kg CO₂ eq/m².

A partir de este ejemplo, el cálculo de las seis unidades de obra restantes incluidas en el estudio se desarrolla de forma análoga en un anexo específico.

3.5.6 Tablas base de impacto ambiental por unidad de obra

Con el fin de disponer de valores unitarios y trazables en este apartado se sintetiza en una tabla el Potencial de Calentamiento Global de cada una de las unidades de obra asociadas a la reparación de la estructura derivada del proceso de la corrosión. Esta tabla constituye el equivalente ambiental de la tabla de coste unitario materializada en el apartado 3.4 y permite vincular de manera directa cada intervención con su impacto por unidad de superficie. La siguiente tabla es resultado de la combinación del ejemplo realizado correspondiente a la reparación de paramentos con mortero R4 del anterior apartado y del Anexo I, donde se realiza el cálculo detallado del resto de unidades de obra consideradas.

Nº	Actuación	Descripción	Unidad	Código (BPA ADIF)	PCG (kg CO ₂ eq/m ²)
1	Picado mecánico de superficie de hormigón	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	m ²	Descompuesto actualizado BPA	3.82
2	Chorro de armaduras	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA070\$	2.19
3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	m ²	Descompuesto actualizado BPA	2.57
4	Reconstrucción con mortero R4	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m ² por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm ² , y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA140\$	19.58
5	Inhibidor de corrosión	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasa la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 μA/cm ² , no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m ² , previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA180\$	0.37

6	Pintura anticarbonatación	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m ² en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA190\$	1.26
7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: Laminado y Hoja de fibra	Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo. Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA160\$ + OGA170\$	54.76
7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: Solo Hoja de fibra	Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA170\$	5.52

La tabla definida constituye una parte fundamental para la posterior construcción de los distintos estadios de degradación, permitiendo combinar las actuaciones necesarias en cada caso y estimar de forma objetiva el impacto ambiental asociado a la evolución del daño.

3.6 Estados de degradación por corrosión

3.6.1 Objetivo y alcance del sistema de estadios

En este apartado se define un sistema de clasificación del estado de degradación por corrosión aplicable a vigas tipo π de hormigón armado en puentes y pasos inferiores ferroviarios, que permite traducir los resultados de una inspección técnica en un estadio de degradación claramente identificado.

La finalidad principal de este sistema de estadios es facilitar la toma de decisiones en la gestión de infraestructuras, proporcionando a la administración una referencia clara del estado en el que se encuentra el elemento estructural, así como del impacto económico y ambiental asociado a dicho estado. Y aún más importante, dar una referencia de incremento de magnitud en el impacto económico y ambiental que se generaría en un escenario hipotético donde se tome la decisión de retrasar la intervención en dicha estructura. De este modo, se establece un vínculo directo entre la inspección visual y el análisis de consecuencias derivadas del retraso en la intervención.

Este enfoque está adaptado de tal manera que reproduzca la práctica real de la inspección de estructuras existentes, en la cual un inspector dispone fundamentalmente de información visual, mediciones sencillas y, en algunos casos, datos complementarios procedentes de ensayos previos. En consecuencia, el sistema se basa en indicadores observables en campo, evitando la necesidad de análisis estructurales detallados, ensayos específicos y modelos avanzados de deterioro que exceden el alcance de una inspección ordinaria.

Como ya se mencionó en apartados anteriores, el alcance del sistema se limita al análisis de un único elemento estructural de una tipología en concreto. En este caso, se selecciona el tablero constituido por vigas tipo π al tratarse del elemento estructural más representativo y recurrente en los casos analizados, y aquel en el que se han identificado de forma sistemática patologías asociadas a la corrosión de armaduras. No se consideran en este sistema otros elementos de la estructura, como estribos, pilas o cimentaciones, ni tipologías estructurales distintas (estructuras de fábrica, metálicas o de hormigón pretensado), cuyo comportamiento frente a la corrosión y estrategias de intervención difieren significativamente.

El sistema de clasificación se articula en cuatro estadios de degradación, abarcando así situaciones de daño incipiente hasta estados en los que la reparación deja de ser técnica y económicamente viable. Estos estadios no pretenden representar una evolución continua ni exhaustiva del proceso de corrosión, sino definir una serie de rangos operativos claramente diferenciados y coherentes con las soluciones de intervención habitualmente adoptadas en la práctica profesional.

Finalmente, el sistema propuesto de estadios se concibe como una herramienta de carácter comparativo, orientada a evaluar el incremento de coste económico y del impacto ambiental asociado al avance del proceso de degradación cuando la intervención se retrasa con el tiempo. En este sentido, no se pretende establecer un diagnóstico estructural definitivo, sino un marco teórico que permita valorar las consecuencias de la inacción o de la demora en la reparación.

3.6.2 Patologías e indicios inspeccionables a considerar

La clasificación del estado de degradación por corrosión de las vigas tipo π se centra en la identificación sistemática de patologías e indicios observables durante una inspección técnica, poniendo como prioridad aquellos síntomas en la estructura que pueden ser evaluados de forma visual o mediante comprobaciones sencillas en campo.

A partir de una revisión bibliográfica y del análisis de los informes de inspección y reparación de las quince estructuras que sirven como base empírica de este trabajo, se han identificado una serie de patologías recurrentes, cuya presencia, extensión y severidad resultan determinantes para la clasificación del elemento en uno de los estadios de degradación definidos. Estos indicios se agrupan a continuación en distintas categorías para facilitar su evaluación durante la inspección.

a) Indicadores de humedad y entrada de agentes agresivos

La presencia de humedad persistente constituye uno de los principales factores desencadenantes del proceso de corrosión en las estructuras de hormigón armado. Durante la inspección, deben identificarse y documentarse a los siguientes indicios:

- Ennegrecimientos superficiales asociados a un sometimiento constante de humedad.
- Esgurridos y manchas en el intradós y laterales de las vigas.
- Zonas con acumulación de agua o drenaje deficiente.
- Presencia de eflorescencias o depósitos superficiales.

En las estructuras analizadas, estos indicios se concentran habitualmente en:

- Juntas longitudinales entre vigas.
- Encuentros de viga-tablero.
- Zonas de voladizos y bordes de tablero.
- Áreas situadas bajo sistema de drenaje poco eficientes.

Cuando se presentan estos fenómenos se considera que son indicadores indirectos de un entorno favorable a la corrosión, aun cuando no exista todavía evidencia directa de daño en la armadura de la estructura.

b) Fisuración del hormigón

La fisuración del hormigón constituye un indicio relevante del estado del recubrimiento y de la posible interacción del entorno con las armaduras, especialmente cuando se desarrollan en la dirección a estas. Durante la inspección se deben considerar los siguientes aspectos:

- Fisuras superficiales, aisladas y sin signos de actividad.
- Fisuras con una apertura mayor o con extensión considerable, especialmente si están asociadas a filtraciones de agua.
- Fisuras longitudinales paralelas a la dirección de las armaduras principales.

En particular las fisuras longitudinales localizadas en el intradós de las vigas tipo π son de especial relevancia ya que suelen estar asociadas a procesos de corrosión incipiente o en desarrollo en dichas armaduras.

c) Pérdida de recubrimiento: Desconchones y delaminación

La degradación del recubrimiento de hormigón es una de las patologías más evidentes e identificables que están directamente relacionadas con la corrosión de las armaduras. En este grupo se incluyen:

- Desconchones puntuales de pequeño tamaño.
- Desconchones extensos o repetidos.
- Zonas con delaminación del recubrimiento, detectables mediante inspección visual o percusión.
- Pérdida completa del recubrimiento con armadura a la vista.

La localización, frecuencia y profundidad de los desconchones constituyen un criterio fundamental para evaluar la severidad del daño, especialmente si estos afectan de manera repetitiva una misma zona del elemento.

d) Evidencia directa de corrosión de armaduras

La aparición de signos directos de corrosión permite avanzar en la clasificación del estadio de degradación. Entre los indicios relevantes a considerar están:

- Manchas de óxido en la superficie de hormigón.
- Exudaciones de productos de corrosión.
- Armaduras vistas con presencia de óxido.
- Separación visible entre el hormigón y la armadura.

Estos síntomas indican que el proceso de corrosión ya está en una fase de propagación y su extensión y severidad deberán evaluarse conjuntamente con la pérdida de recubrimiento.

e) Pérdida de sección y afección estructural de las armaduras

La pérdida de sección de las armaduras ya representa un punto crítico en la evolución del daño, ya que puede comprometer la capacidad resistente del elemento. Si durante la inspección se detecta la presencia de armadura vista se deberá evaluar:

- Presencia de corrosión generalizada frente a localizada.
- Grado de reducción aparente del diámetro de las barras.
- Afección simultánea de armaduras longitudinales y cercos.
- Extensión del daño a lo largo de la viga.

La identificación de pérdidas de sección significativas, especialmente aquellas que superan los umbrales, constituye un criterio determinante para la clasificación en estadios avanzados y para la necesidad de adoptar soluciones de refuerzo estructural.

f) Consideraciones sobre carbonatación y ensayos complementarios

La carbonatación del hormigón es un fenómeno que está directamente relacionado con la despasivación de las armaduras. No obstante, su identificación precisa y objetiva requiere la realización de ensayos específicos (por ejemplo, el de la fenolftaleína), que no siempre están disponibles en una inspección ordinaria.

En el sistema propuesto, la carbonatación se considera un indicador complementario, que puede reforzar la interpretación de otros síntomas observables, pero no se adopta como criterio principal de clasificación en ausencia de datos experimentales fiables.

Con este conjunto de patologías e indicios se establece una base común de observación, a partir de la cual el inspector puede evaluar de forma sistemática el estado de las vigas tipo π de una estructura. En el apartado posterior se definirán las métricas prácticas para cuantificar la severidad de estos síntomas y su combinación para la asignación de un estadio de degradación.

3.6.3 Métricas prácticas para cuantificar severidad

Habiendo identificado las patologías e indicios de un proceso de corrosión en las vigas π , es necesario establecer diversas métricas que sean prácticas y objetivas para cuantificar la severidad de un daño detectado, tratando de eliminar la subjetividad inherente a una inspección visual realizada por un inspector y a la vez de facilitar la asignación de un estadio de degradación al elemento estructural.

Para poder establecer dichas métricas hay tres criterios fundamentales a tener en cuenta:

- Ser aplicable en una inspección ordinaria.
- Ser coherente con la información disponible en informes reales realizados.
- Ser capaz de discriminar de forma clara y facilitar el proceso de decisión entre distintos niveles de degradación.

En base a estos criterios las métricas son las siguientes:

a) Porcentaje de superficie afectada

La métrica principal para cuantificar la extensión del daño es el porcentaje de superficie afectada, que está definida como la relación entre la superficie del elemento que presenta patologías asociadas con el proceso de la corrosión y la superficie total del elemento.

En el caso de las vigas π , la superficie total a la que se hace referencia incluye el intradós de las vigas o cara inferior de los nervios, las caras laterales de las vigas o nervios, la cara inferior o intradós de la losa del tablero situada entre vigas y las caras laterales (voladizos y bordes) a ambos lados del tablero.

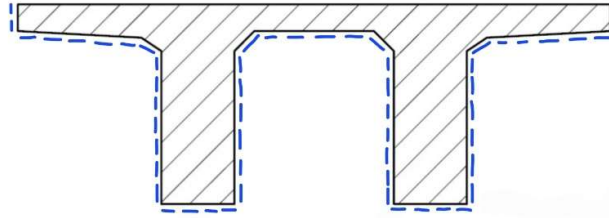


Figura 43 Superficie a tomar en cuenta en una estructura formada por una viga π (elaboración propia)

En el caso donde el puente o paso inferior este formado por dos vigas π , una al lado de la otra, se tomarán los mismos criterios que los mencionados anteriormente con la única excepción de descontar las caras laterales interiores de las vigas que forman la junta longitudinal entre ambos elementos.

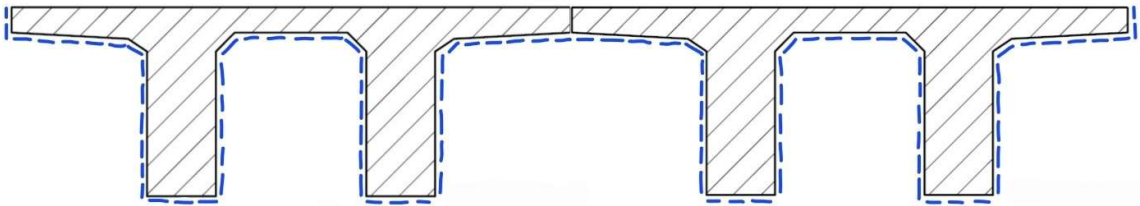


Figura 44 Superficie a tomar en cuenta en una estructura formada por dos vigas π (elaboración propia)

El porcentaje de superficie afectada se expresa de forma aproximada como un valor puntual, y permite diferenciar de manera eficaz entre daños localizados y daños generalizados. Esta métrica se considera especialmente adecuada para vincular la inspección con los costes económicos y ambientales por unidad de superficie.

b) Severidad del daño en el recubrimiento de hormigón

Además de la extensión del daño, es crucial hacer una evaluación de la severidad de este, en especial con relación al estado de recubrimiento del hormigón. A tal objeto, se distinguen los siguientes niveles cualitativos:

- Daño superficial: fisuras finas, desconchones de pequeña entidad y pérdida limitada del recubrimiento, **sin exposición de armaduras**.
- Daño moderado: Desconchones con **armadura vista de forma puntual**, delaminaciones localizadas y fisuras asociadas a procesos de corrosión en una fase inicial.
- Daño severo: Pérdida generalizada del recubrimiento, **armaduras vistas de forma recurrente** y presencia de productos derivados del proceso de corrosión.

Estos tres niveles permiten discriminar situaciones donde por un lado se necesitaría una intervención que se limite a la reparación del recubrimiento y por otro se necesite una

intervención en la que el proceso de corrosión se encuentra en una etapa más avanzada requiriendo una reparación mayor.

c) Presencia y características de la fisuración

Al momento de evaluar la fisuración se debe atender a la naturaleza de la fisura, su distribución y la relación de estas con las armaduras, considerándose los siguientes aspectos:

- Fisuras aisladas, sin continuidad ni signos de actividad.
- Fisuras abiertas o continuas, especialmente si presentan factores que favorecen al proceso de la corrosión como escurridos o filtraciones.
- Fisuras longitudinales paralelas a la dirección de las armaduras principales, consideradas indicativas de procesos de corrosión en fase de propagación.

La presencia de fisuración longitudinal asociada a armaduras se considera un factor con una severidad relevante, especialmente si se combina con otros síntomas como la armadura vista o manchas de óxido.

d) Presencia de armaduras vistas y signos de corrosión activa

La exposición de las armaduras constituye un umbral cualitativo clave en la evolución del daño. Debido a esto es que en la inspección se ha de registrar lo siguiente:

- Existencia de armaduras vistas de forma puntual o generalizada.
- Presencia de óxido activo, exudaciones o desprendimiento de productos de corrosión.
- Afección simultánea de armaduras longitudinales y cercos.

La presencia de armadura vista, combinada con signos de corrosión activa son indicativos de que el proceso se encuentra en una fase avanzada y condiciona de forma decisiva la clasificación del estadio de degradación.

e) Estimación de la pérdida de sección de armaduras

Cuando exista armadura vista, se propone realizar una estimación directa de la pérdida de sección mediante observación y mediciones sencillas previo cepillado de la armadura para retirar el óxido (comparación visual con diámetros nominales).

En base a la documentación recopilada en el estado del arte y a efectos de este trabajo, se adoptan los siguientes criterios orientativos para elementos estructurales sometidos a flexión, en este caso, las vigas π :

- Pérdida de sección despreciable o leve: Reducción aparente inferior al 15%.
- Pérdida de sección significativa: Reducción igual o superior al 15%.

Este umbral se considera como un punto de inflexión, a partir del cual resulta necesario plantear una solución que incluya un refuerzo estructural dentro de la intervención al

elemento, y se emplea como criterio determinante para la transición a un estadio avanzado de degradación.

f) Carácter crítico de determinados indicadores

Es importante tomar en cuenta que no todas las métricas tienen el mismo peso en la clasificación del estadio. En particular, se consideran indicadores críticos aquellos cuya presencia puede determinar directamente la asignación a un estadio avanzado, con independencia del porcentaje global de superficie afectada. Entre ellos se incluye:

- Pérdidas de sección significativas en armaduras principales.
- Afección generalizada de cercos y armaduras longitudinales.
- Daños extensos en zonas estructuralmente críticas como la cara inferior de los nervios o intradós de las vigas.

Habiendo definido estas métricas, se dispone de un marco cuantitativo y cualitativo lo suficientemente sólido como para evaluar la severidad del daño resultado del proceso de la corrosión en vigas tipo π . Con esta base, en el siguiente apartado se integran estas métricas y criterios junto con los informes técnicos recopilados para valorar las estructuras que sirven de muestra para este trabajo.

3.6.4 Análisis de casos reales y calibración preliminar

Con el objetivo de dotar de base empírica al sistema de estadios de degradación propuesto, se ha realizado un análisis cualitativo y comparativo en base a las métricas comentadas y los informes técnicos de los 15 tableros de vigas π incluidos en el presente estudio.

Para cada estructura se ha recopilado y sistematizado la información procedente de los informes de inspección y de los proyectos de reparación, atendiendo a los siguientes parámetros clave:

- Porcentaje de superficie del tablero afectada por patologías derivadas del proceso de la corrosión.
- Presencia de armadura vista.
- Existencia de pérdida de sección significativa en las armaduras.
- Necesidad o no de refuerzo estructural mediante CFRP.
- Observaciones relevantes que condicionaron la intervención adoptada.

La tabla siguiente recoge la ordenación de las estructuras en función del porcentaje de superficie afectada ordenándolas en primer lugar la que menos % de superficie afectada presenta y en último lugar la que más % de superficie afectada presenta, permitiendo identificar patrones comunes y puntos de inflexión relevantes en la toma de decisiones técnicas.

Nº	Denominación de la estructura	% Sup afectada	Armadura vista	Perdida de sección >15%	CFRP	Observaciones
14	Puente Riera de Palau (Can Trias)	1%	Si	No	No	Intervención temprana en el desarrollo de la corrosión, debido a esto la superficie afectada no es significativa.
3	Paso inferior	1%	Si	No	No	Intervención temprana en el desarrollo de la corrosión, debido a esto la superficie afectada no es significativa.
15	Puente sobre el río El Manol	3%	Si	No	No	Intervención temprana en el desarrollo de la corrosión, debido a esto la superficie afectada no es significativa.
5	Puente sobre el arroyo de la Aldehueta	10%	Si	No	No	Armadura vista en zonas puntuales, pero de manera generalizada. Humedades y ennegrecidos en juntas transversales y voladizos.
6	Puente sobre el río Mayor	10%	Si	No	No	Armadura vista en zonas puntuales, pero de manera generalizada. Humedades y ennegrecidos en juntas transversales y voladizos.
1	Viaducto sobre el corredor del Jarama	12%	Si	No	No	Intervención temprana en el desarrollo de la corrosión, debido a esto la superficie afectada no es significativa.
7	Paso inferior sobre la carretera N-420	15%	Si	No	No	Escurridos y saltados en cara inferior de ambos voladizos.
8	Paso inferior sobre camino Cañamares	13%	Si	No	No	Escurridos y saltados en cara inferior de ambos voladizos.
12	Paso inferior sobre la carretera N-111A	17%	Si	No	No	La reparación principal es debida al golpe de una viga con un vehículo, causando una aceleración en el proceso de la corrosión.
11	Paso inferior arroyo Baranquillo	20%	Si	No	No	Armadura vista y desconchones en nervios derecho e izquierdo. Escurridos y saltados en cara inferior de tablero y voladizos.
13	Puente sobre el Río Corbones	21%	Si	No	No	Armadura vista y desconchones en nervios derecho e izquierdo. Escurridos y saltados en cara inferior de tablero y voladizos.
9	Paso inferior sobre camino Hoya Botica	22%	Si	No	No	Armadura vista y desconchones en nervios derecho e izquierdo. Escurridos y saltados en cara inferior de tablero y voladizos.
2	Puente sobre la carretera CT-34	30%	Si	No	No	Afecciones de gran entidad en nervios derecho e izquierdo.
4	Paso inferior Acceso al Puerto	30%	Si	No	No	Afecciones de gran entidad en nervios derecho e izquierdo.
10	Paso inferior sobre la carretera CR-502	50%	Si	Si	Si	Se usa fibra de carbono para reforzar la armadura longitudinal y transversal.

3.6.4.1 Distribución del daño por superficie afectada

El análisis de los casos reales muestra una clara concentración de estructuras en el intervalo comprendido entre el 10% y el 30% de superficie afectada, siendo a efectos de este análisis el rango más habitual en vigas π que presentan procesos de corrosión activos.

Si nos vamos a los extremos del espectro, en el extremo inferior se identifican varios porcentajes reducidos rondando el 1% y 3% que corresponden a estructuras cuya intervención principal no está motivada por el fenómeno de la corrosión, sino por otras afecciones, y en las que se aprovechó la ocasión para actuar en estas estructuras y realizar reparaciones preventivas frente a la corrosión. Estos casos son importantes, ya que confirman la existencia de una fase temprana de degradación, en la que la corrosión es aún limitada y no condiciona de forma significativa la integridad estructural.

3.6.4.2 Relación entre superficie afectada y severidad estructural

Uno de los resultados más relevantes del análisis efectuado es la ausencia de relación directa entre el porcentaje de superficie afectada y la necesidad de refuerzo estructural.

En concreto se observa que existen estructuras con porcentajes de superficie afectada del orden del 30% que no requirieron refuerzo estructural, actuando en estos mediante técnicas convencionales de reparación del hormigón y protección frente a la corrosión.

Por el contrario, solo una de las quince estructuras analizadas requirió refuerzo estructural mediante CFRP, presentando un porcentaje de superficie afectada del 50%, acompañado de indicios claros de pérdida de capacidad resistente.

Este hecho pone en manifiesto que el criterio determinante para la adopción de soluciones que implican un refuerzo estructural no es la extensión superficial del daño, sino la afección efectiva de las armaduras principales, en particular la pérdida de sección asociada a procesos avanzados de corrosión.

3.6.4.3 Umbral práctico de aparición de refuerzo estructural

En la muestra analizada, la necesidad de refuerzo está directamente relacionada a una pérdida de sección de armaduras significativa (superior a valores admisibles desde el punto de vista estructural, llegando a una pérdida de sección del 50% en armaduras longitudinales en el caso analizado) y a una afección simultánea de armaduras longitudinales y transversales, imposibilitando así la garantía de la capacidad portante únicamente mediante una reparación convencional y aplicación de un sistema de protección.

Se observa que la aparición de refuerzo mediante CFRP constituye un salto cualitativo en el tipo de intervención, con implicaciones técnicas, económicas y ambientales muy superiores a las de reparaciones convencionales. Este salto no se produce de forma progresiva con el aumento de superficie afectada, sino que corresponde a la superación de un umbral estructural.

3.6.4.4 Ausencia de casos de degradación extrema

Es necesario destacar que en el conjunto de estructuras analizadas no se cuenta con casos con porcentajes de superficie afectada superiores al 50%, ni situaciones en las que se plantease la sustitución del tablero o del elemento estructural. Esta circunstancia pone de relieve que los datos disponibles cubren de forma robusta la fase incipiente, moderada y severa de degradación, pero no la fase terminal del ciclo de vida del elemento.

No obstante, la experiencia recogida permite establecer criterios coherentes para definir un estadio de degradación extremo, asociado a situaciones en las que la extensión y severidad del daño comprometen la viabilidad técnica o económica de cualquier solución de refuerzo.

3.6.4.5 Implicaciones para la definición de los estadios

El análisis de los casos reales confirma lo siguiente:

- Los estadios iniciales y moderados de degradación pueden definirse de manera fiable en función del porcentaje de superficie afectada.
- Los estadios avanzados deben definirse prioritariamente en función de la necesidad de refuerzo estructural y no exclusivamente por criterios geométricos y de superficie.
- La transición entre estadios no es lineal ni continua, sino que presenta puntos de inflexión claros, asociados a la aparición de daños estructuralmente relevantes.

Estas conclusiones constituyen la base para la definición operativa de los cuatro estadios de degradación por corrosión que se presenta en el siguiente apartado.

3.6.5 Definición operativa de los cuatro estadios de degradación

A partir de las patologías identificadas y de las métricas definidas en los apartados anteriores en base a la bibliografía y muestra de puentes y pasos inferiores intervenidos, se establecen cuatro estadios de degradación por corrosión aplicables a las vigas tipo π de hormigón armado.

Estos estadios permiten al inspector clasificar el estado del elemento estructural durante una inspección, relacionando los daños observados con las consecuencias técnicas, económicas y ambientales asociadas.

La clasificación que se muestra a continuación se base en una combinación de tres factores primordiales:

- Un valor puntual del porcentaje de superficie afectada estimada por el inspector.
- La severidad de los daños observados.
- Presencia de indicadores críticos, en particular la pérdida de sección de armaduras.

3.6.5.1 Estadio F1 – Degradación incipiente

El Estadio F1 corresponde a situaciones de degradación leve o incipiente, en el que los daños asociados a la corrosión son puntuales y con una severidad baja.

Indicadores característicos:

- Presencia de humedades, escurridos o ennegrecimientos localizados.
- Fisuras finas superficiales, asiladas y sin signos de actividad.
- Desconchones puntuales de pequeña entidad, sin armadura vista o con exposición muy localizada.
- Manchas superficiales de óxido sin evidencia de corrosión activa generalizada.

Criterios a tomar en cuenta:

- %Superficie afectada $\leq 10\%$
- Sin pérdida de sección significativa $< 15\%$
- Sin necesidad de refuerzo estructural
- Necesidad de reparación superficial o preventiva y aplicación de un sistema de protección (inhibidor de corrosión + pintura anticarbonatación).

3.6.5.2 Estadio F2 – Degradación moderada

El Estadio F2 agrupa situaciones en las que la corrosión se encuentra en una fase de desarrollo, con daños más extensos y evidentes, pero sin afección estructural significativa.

Indicadores característicos:

- Desconchones frecuentes, con presencia de armadura vista.
- Fisuración más desarrollada, incluyendo fisuras asociadas a filtraciones de agua.
- Presencia de óxido activo.
- Delaminaciones del recubrimiento en diversas áreas.

Criterios a tomar en cuenta:

- % Superficie afectada $> 10\%$ y $\leq 50\%$
- Sin pérdida de sección significativa $< 15\%$
- Sin necesidad de refuerzo estructural
- Las intervenciones necesarias son reparaciones convencionales, sin necesidad de refuerzo estructural. Y posterior aplicación de un sistema de protección (inhibidor de corrosión + pintura anticarbonatación).

3.6.5.3 Estadio F3 – Degradación severa

El Estadio F3 representa un punto de inflexión en la evolución del daño, al implicar una afección significativa de las armaduras que compromete la capacidad resistente del elemento e implica la necesidad de refuerzo estructural.

Indicadores característicos:

- Desconchones generalizados y pérdida extensa del recubrimiento.
- Armaduras vistas de forma recurrente, con un proceso de corrosión activo.
- Fisura longitudinal asociada a armaduras principales.
- Afección simultánea de armaduras longitudinales y cercos.

Criterio determinante:

- Pérdida de sección de armaduras igual o superior al 15%, aun estas se localicen en zonas concretas. A efectos de este trabajo, la pérdida de sección $\geq 15\%$ se refiere específicamente a la armadura longitudinal principal de los nervios, al ser esta la armadura traccionada que gobierna la capacidad a flexión del tablero y la que se ve directamente compensada por la solución de refuerzo adoptada mediante laminados CFRP longitudinales en el intradós. La presencia de hojas/mallas CFRP en el intradós y caras laterales se considera un refuerzo complementario asociado al control del daño superficial, confinamiento local y mejora del comportamiento en las zonas degradadas, sin alterar el criterio principal de activación de este estadio. De forma complementaria, si durante la inspección se constata una afección severa de armadura transversal (pérdida significativa de cercos, roturas o síntomas compatibles con degradación a cortante), el elemento podrá clasificarse igualmente en F3 por imposibilidad de garantizar condiciones estructurales adecuadas, aun cuando la pérdida estimada en la armadura longitudinal no alcance el umbral del 15%.

Criterios a tomar en cuenta:

- % Superficie afectada es un valor no determinante para entrar en este estadio, el criterio determinante es la necesidad de emplear refuerzo estructural.
- Resulta necesario adoptar soluciones de refuerzo estructural, además de las reparaciones del recubrimiento y posterior aplicación de sistema de protección (inhibidor de corrosión + pintura anticarbonatación).
- En este trabajo se considera representativa la solución de refuerzo mediante sistemas de fibra de carbono.

3.6.5.4 Estadio F4 – Fin de vida funcional del elemento

Este estadio corresponde a situaciones que implican una degradación extrema, en las que las reparaciones o refuerzos del elemento no es técnica, práctica ni económicamente razonable.

Indicadores característicos:

- Pérdida muy elevada y generalizada de sección en las armaduras principales.
- Afección simultánea y extensa de armaduras longitudinales y transversales.
- Daños generalizados en zonas estructuralmente críticas de las vigas.
- Necesidad de intervenciones de tal magnitud que resultan comparables a la sustitución del elemento.

Criterios a tomar en cuenta:

- Se compromete la seguridad de la estructura, teniendo que cerrarla al tráfico imposibilitando la puesta en servicio de la línea.
- % Superficie afectada $\geq 50\%$. Es importante tomar en cuenta que este umbral no es un valor preciso, sino que es un criterio de decisión para la administración.
- Necesidad de refuerzo estructural.
- Imposibilidad técnica/económica de garantizar durabilidad mediante refuerzo.
- Se considera necesaria la sustitución del elemento completo.

Esta definición permite que el inspector, a partir de la observación de los daños y de la estimación del porcentaje de superficie afectada, clasifique de manera clara y reproducible el estado de degradación de una viga tipo π de hormigón armado. En el apartado siguiente se integrarán estos criterios en una matriz de decisión facilitando su aplicación práctica durante la inspección.

3.6.6 Árbol de decisión para la clasificación en inspección

Con el fin de que la clasificación del estado de degradación por corrosión sea aplicable de forma reproducible durante una inspección ordinaria in-situ, se propone un árbol de decisión basado en la combinación de una métrica extensiva como lo es el porcentaje de superficie afectada del tablero de vigas tipo π y criterios críticos de carácter estructural que prevalecen por encima de la extensión superficial del daño cuando están presentes.

Este árbol es una herramienta para que el inspector a partir de observaciones y mediciones simples (principalmente visuales), pueda asignar al elemento uno de los cuatro estadios de degradación definidos, con una lógica jerárquica: primero se evalúan los criterios críticos y, en ausencia de estos, se clasifica en función del porcentaje de superficie afectada.

3.6.6.1 Datos de entrada requeridos en inspección

Para aplicar el árbol de decisión el inspector debe registrar los siguientes datos:

- **Porcentaje de superficie afectada**

Valor puntual obtenido como:

$$\% \text{ Sup. afectada} = \frac{\text{Sup. con patologías atribuibles a la corrosión}}{\text{Sup. total del tablero}} \times 100$$

Para establecer la superficie total del tablero, ver figuras en apartado 3.6.3 donde la superficie total del tablero incluye el intradós de las vigas tipo π o cara inferior de los nervios, las caras laterales de las vigas, el intradós de la losa del tablero situado entre vigas y las caras laterales del tablero incluyendo bordes y voladizos.

- **Indicadores críticos**

- **Necesidad de refuerzo estructural CFRP:** Evaluación técnica basada en pérdida de capacidad resistente en armaduras principales longitudinales. En coherencia con el análisis de los casos reales en 3.6.4, la necesidad de refuerzo se adopta como criterio determinante del Estadio F3, ya que la extensión superficial del daño no implica necesariamente refuerzo si no existe pérdida de capacidad.

Es importante recalcar que la opción de reparación mediante el uso de CFRP, aunque hay otras posibles formas de refuerzo, se adopta por su generalidad de empleo y su capacidad de representar el cambio de escala en la intervención, pasando de una reparación superficial a un refuerzo estructural.

- **Condición de sustitución:** Situación en la que la reparación o refuerzo no resulta razonable en términos técnicos y económicos, ya sea por alta extensión o severidad del daño definida en el apartado 3.6.6.4.

3.6.6.2 Lógica jerárquica de clasificación

El árbol de decisión se aplica en el orden siguiente, priorizando los criterios críticos sobre el porcentaje de la superficie:

1. Comprobar si existe condición de sustitución (Estadio F4).
2. Si no, comprobar si existe necesidad de refuerzo CFRP (Estadio F3).
3. Si no, clasificar por % en función de la superficie afectada entre Estadio F1 y Estadio F2.

Este enfoque evita asignar automáticamente soluciones de refuerzo a situaciones de daño extensivo, pero no estructural y mantiene un carácter práctico y realista del modelo propuesto.

3.6.6.3 Árbol de decisión

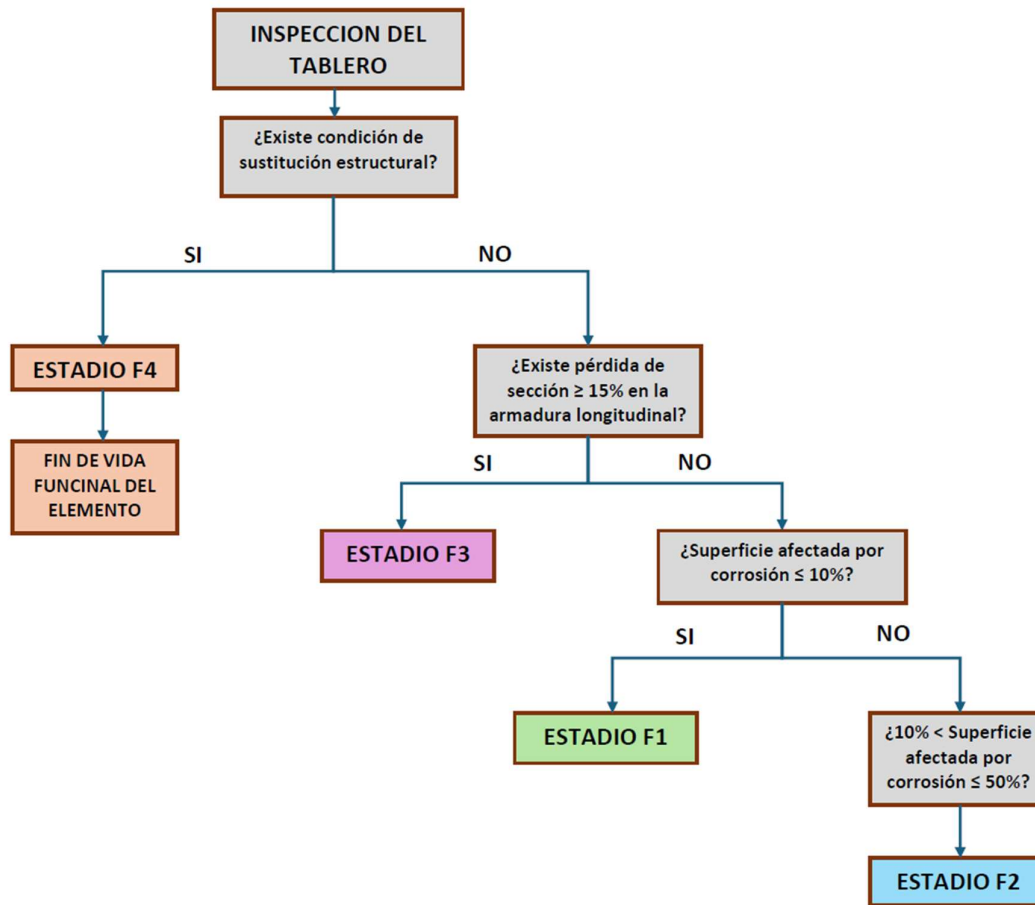


Figura 45 Árbol de decisión para la clasificación del estado de degradación por corrosión en tableros de vigas tipo pi. Elaboración propia

El rango superior del Estadio F2 ($\leq 50\%$) se adopta como umbral operativo para diferenciar daños moderados de situaciones de degradación muy extensa, sin implicar refuerzo por sí mismo. La matriz está diseñada para garantizar que el incremento abrupto del coste e impacto asociados al Estadio F3 se produzca únicamente en los casos donde el refuerzo es técnicamente necesario, evitando clasificaciones erróneas basadas exclusivamente en la extensión superficial del daño.

3.6.6.4 Tratamiento de situaciones de frontera entre estadios

En la práctica de inspección pueden presentarse situaciones donde los indicadores observados se sitúan próximos a los umbrales definidos para la transición entre estadios. Con el fin de mantener coherencia y seguridad del sistema de clasificación, se establece la siguiente regla de prioridad:

- En caso de duda entre dos estadios, se asignará siempre el estadio más desfavorable.
- Los criterios estructurales prevalecen sobre los criterios superficiales.

En particular, si se detectara una pérdida de sección de armadura longitudinal cercana al 15%, se recomienda considerar la estructura dentro del estadio F3, especialmente cuando existan indicios adicionales de deterioro por corrosión activo.

Este criterio es coherente con el objetivo del trabajo, facilitando así la toma de decisiones en base a un mantenimiento preventivo, evitando el alcance de estados que impliquen soluciones estructurales complejas.

3.6.6.5 Definición operativa de la condición de sustitución (Estadio F4)

Dado que la muestra de casos reales analizados no incluye situaciones de degradación extrema, el Estadio F4 se define con un criterio conservador y combinado, evitando depender únicamente de un umbral porcentual.

En base a esto se define que existe condición de sustitución cuando concurren:

- Alta extensión del daño con %Sup. > 50% del tablero afectado por patologías atribuibles a corrosión.
- Alta severidad estructural manifestada por al menos uno de los siguientes indicadores:
 - Pérdida de sección muy elevada y generalizada en armaduras principales.
 - Afección simultánea extensa de armaduras longitudinales y cercos.
 - Necesidad de refuerzo estructural tan generalizada que la intervención resulta comparable a la sustitución del elemento.
 - Imposibilidad de garantizar una durabilidad razonable mediante reparación o refuerzo bajo un criterio técnico.
 - Imposibilidad de garantizar la seguridad de la estructura cuando está en servicio.

De esta manera se puede clasificar el Estadio F4 sin incurrir en un umbral a partir del cual, si se supera, siempre se deba sustituir. Este criterio es coherente con la práctica de conservación ya que la sustitución únicamente se adopta cuando el refuerzo deja de ser una opción proporcional y razonable.

3.6.6.6 Salidas del árbol de decisión y vinculación con los apartados de valoración

Una vez asignado el estadio de degradación, el sistema permite asociar de forma directa:

- El paquete de intervención representativo del estadio (reparación superficial, reparación convencional, refuerzo CFRP o sustitución)
- El coste económico unitario (€/m²) definido en las tablas previas
- El impacto ambiental unitario (kg CO₂ eq/m²) definido en las tablas previas.

3.6.6.7 Observación sobre el análisis temporal entre estadios

La matriz de decisión propuesta clasifica el estado del elemento en el momento de la inspección, sin incorporar directamente la variable del tiempo.

La estimación del tiempo medio de transición entre estadios se abordará en un apartado posterior mediante modelos de propagación de corrosión, permitiendo analizar la evolución esperable del estado del elemento y las consecuencias del retraso en la intervención.

3.7 Análisis temporal de transición entre estadios mediante un enfoque tipológico

3.7.1 Objetivo y criterios de aplicación

El objetivo de este apartado es estimar de forma práctica y aplicable en una inspección ordinaria los tiempos medios de transición entre los estadios de degradación por corrosión definidos en el apartado anterior (F1 a F4), evitando así la aplicación de un modelo específico para una estructura en concreto. Esto debido a que la finalidad es que el gestor de la infraestructura disponga de una referencia temporal clara sobre cuánto tiempo, en promedio, tardara un tablero tipo de vigas π en evolucionar de un estadio a otro una vez la corrosión esta activa y no se interviene para frenarla.

Para ello se adopta un enfoque basado en los siguientes principios:

- Se define un conjunto de hipótesis representativas como el recubrimiento y los diámetros de las armaduras que componen el tablero.
- Se estima un tiempo de propagación representativo mediante el uso del método propuesto en el Código Estructural contemplado en el apartado 2.9.3.2 del estado del arte.
- Se obtiene la intensidad de corrosión mediante el uso del modelo de Li 2004a, donde en base al apartado 2.9.3.1 del estado del arte se concluye que es un modelo fiable y suficientemente representativo con la realidad.
- Se transforma la intensidad en una velocidad de penetración del ataque por corrosión mediante la relación propuesta por Feliu & Andrade tratada en el apartado 2.9.3.3 siendo esta la más usual para estos modelos.

Este procedimiento permite construir una herramienta operativa sin necesidad de conocer, para cada estructura en específico, parámetros como la relación agua/cemento, el tipo de cemento, coeficientes de difusión, recubrimiento real, entre otras variables que son difíciles de obtener de forma sistemática.

Es importante recalcar que para determinar que el elemento estructural pertenece a un estadio F1 o un estadio F2 se aplica un criterio basado en la superficie afectada y daños observables (criterios definidos en el apartado 3.6), no así por pérdida de sección de la armadura. En este apartado la pérdida de sección que se utilizara en los estadios F1 y F2 se emplea solo como variable auxiliar para dotar de una escala temporal a la evolución del daño.

3.7.2 Hipótesis tipológicas para un tablero de vigas π

- **Diámetros de armadura**

Para las armaduras que componen el tablero se fijan como valores representativos un diámetro $\varnothing = 10\text{mm}$. para armadura transversal y un diámetro $\varnothing = 20\text{mm}$. para la armadura longitudinal principal.

- **Recubrimiento representativo**

Para tableros de vigas π de hormigón armado, se adopta un recubrimiento tipológico de:

$$C = 30\text{mm}.$$

Este es un valor representativo de tableros existentes de hormigón armado en base a la EHE-98 y es coherente con el carácter “parque construido antes de los años 2000” de las campañas de ADIF analizadas, permitiendo así una estimación general sin mediciones destructivas caso a caso. De esta forma el método queda parametrizado y es reescalable si el gestor dispone de información referente a recubrimientos específicos.

- **Clase de exposición para el cálculo temporal**

Para los tableros y pasos inferiores analizados, las patologías dominantes observables en inspección (humedades persistentes, escurridos y ciclos de mojado-secado) son compatibles con un ambiente de carbonatación y humedad elevada, además de una alternancia de ciclos de humedad y secado.

Siendo conservadores y de manera general, se adopta como escenario base una clase de exposición XC4, evitando asumir ambientes XS o XD salvo evidencia clara de ambiente marino o sales fundentes.

En base a esto la velocidad de corrosión se toma en base a la siguiente tabla presente en el Anejo 12 del código estructural:

Clase de exposición			v_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
Ambiente normal	Seco o permanentemente húmedo	XC1	1
	Humedad alta	XC2	4
	Humedad moderada	XC3	2
	Ciclos humedad – secado	XC4	5
Ambiente marino	Expuesto a aerosoles marinos	XS1	20
	Sumergido permanentemente	XS2	4
	Zona de mareas o salpicaduras	XS3	50
Ambiente con sales fundentes	Humedad moderada	XD1	35
	Humedad alta	XD2	20
	Ciclos humedad - secado	XD3	35

Figura 46 Tabla A12.4.1 Velocidad de corrosión (Comision Permanente del Hormigon & Comision Permanente de Estructuras de Acero, 2021)

En base a esta tabla se obtiene que la velocidad de corrosión es de $5 \mu\text{m/año}$. Al tomar como base este escenario, se establece que la estructura está sometida a condiciones agresivas permitiendo así un margen de seguridad. Al igual que el valor del recubrimiento, si el gestor cuenta con datos específicos acerca del tipo de ambiente es posible reescalar el método con dichos datos.

- **Factor de picaduras**

Según se establece en la bibliografía tratada en el apartado 2.9.3.3 del estado del arte, el valor α se encuentra típicamente en un intervalo de 4-8 según diferentes autores si el elemento se encuentra sometido a un ataque por cloruros. Caso contrario, el valor α es igual a la unidad.

Como se mencionó previamente, **las hipótesis adoptadas cumplen un rol representativo**, adecuadas para fines de inspección y gestión de los activos, teniendo en cuenta que el trabajo propone una herramienta aplicable no solo a un caso en concreto sino a un parque de puentes objeto de gestión. Estas hipótesis evitan la necesidad de exigir parámetros específicos que usualmente son difíciles de obtener en la práctica.

3.7.3 Representatividad de los diámetros empleados

La selección de los diámetros $\emptyset = 10\text{mm}$. para armadura transversal y un diámetro $\emptyset = 20\text{mm}$. para la armadura longitudinal principal responde a dos criterios fundamentales:

- Se trata de diámetros habituales en estructuras de hormigón armado correspondientes a tableros de esta tipología predominante en los casos analizados en este trabajo, cumpliendo a su vez el criterio “parque construido antes de los años 2000” de las campañas de ADIF analizadas.
- Debe tenerse en cuenta que el enfoque desarrollado en el presente trabajo no pretende modelizar con precisión el comportamiento de una estructura concreta, sino proporcionar una estimación tipológica de los tiempos de transición entre estadios de degradación que pueda ser utilizada como referencia en procesos de inspección y gestión del patrimonio estructural.

En base a esto, el modelo desarrollado se apoya en una hipótesis simplificada pero representativa, que permite obtener órdenes de magnitud razonables de los tiempos de transición entre estadios. Dichos valores deben interpretarse como referencias orientativas para la planificación y no como predicciones exactas de la evolución del deterioro de una estructura individual.

3.7.4 Estimación del periodo de propagación t_p

En el Anejo 12 del ya citado Código Estructural se propone para el tiempo desde el inicio de la corrosión hasta la fisuración del recubrimiento la siguiente expresión:

$$t_{fis,corr} = \frac{P_{corr}}{V_{corr}} = \frac{80 * c}{\emptyset * V_{corr}}$$

Donde:

C es el recubrimiento en mm.

\emptyset es el diámetro en mm

V_{corr} es la velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$

A efectos de este trabajo se adopta este tiempo como el periodo de propagación T_p por ser un umbral coherente con la detectabilidad del daño en una inspección (fisuración asociada a productos de corrosión y pérdida de adherencia) y por permitir trabajar con una duración representativa sin requerir parámetros específicos de iniciación.

Con los valores asumidos $C = 35\text{mm}$. y $V_{corr} = 5 \mu\text{m/año}$ se tiene lo siguiente:

- Para la armadura longitudinal $\varnothing = 20\text{mm}$.

$$t_{p,long} = \frac{80 * 30}{20 * 5} = 24 \text{ años}$$

- Para la armadura transversal $\varnothing = 10\text{mm}$.

$$t_{p,trans} = \frac{80 * 30}{10 * 5} = 48 \text{ años}$$

3.7.5 Intensidad de corrosión según el modelo de Li (2004a)

Mediante el uso del modelo de Li (2004a), que relaciona la intensidad de corrosión con el periodo de propagación se tiene lo siguiente:

$$i_{corr} = 0.3683 * \ln(t_p) + 1.1305$$

- Para la armadura longitudinal $\varnothing = 20\text{mm}$.

$$i_{corr} = 0.3683 * \ln(24) + 1.1305 = 2.30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

- Para la armadura transversal $\varnothing = 10\text{mm}$.

$$i_{corr} = 0.3683 * \ln(48) + 1.1305 = 2.56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

3.7.6 Velocidad de penetración por corrosión y tratamiento del ataque localizado

La intensidad de corrosión obtenida mediante el modelo de Li (2004a) se transforma en una velocidad de penetración media del ataque por corrosión empleando la relación propuesta de Feliu & Andrade, ampliamente utilizada en patología del hormigón armado:

$$P_{av}(\text{mm/año}) = 0.0116 * i_{corr}$$

Donde i_{corr} se expresa en $\mu\text{A} / \text{cm}^2$, esta expresión representa una penetración media y permite estimar una evolución temporal general sin introducir parámetros adicionales.

Sin embargo, en presencia de ataque por cloruros la corrosión suele manifestarse con picaduras (penetración máxima local superior a la media). En dichos casos se emplea habitualmente un factor α (diversos autores lo sitúan en el rango aproximado de entre 4 y 8 como se menciona en el apartado 2.9.3.3 del estado del arte) para relacionar la penetración máxima con la media.

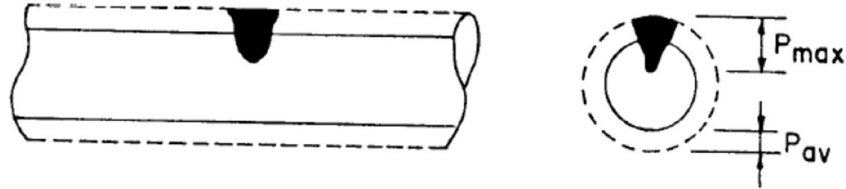


Figura 47 Corrosión homogénea (P_{av}) y máxima profundidad de ataque (P_{max}) (Rodríguez & Andrade, 2001)

Sin embargo, dado que el objetivo de este trabajo es construir una herramienta general y aplicable a una inspección ordinaria (sin clasificar caso a caso la naturaleza del agente agresivo ni la morfología de las picaduras), no se adopta este factor α en el cálculo base, evitando el riesgo de sobredimensionar sistemáticamente la velocidad de deterioro.

Este criterio es además operativo: Si el gestor dispone de evidencia clara de corrosión por cloruros con ataque localizado, el modelo puede reescalarsse de forma directa debido a la linealidad de la expresión:

$$P_{max}(mm/año) = P_{av} * \alpha \rightarrow t_{\alpha} = \frac{t}{\alpha}$$

Es decir, incorporar este valor reduce los tiempos en la misma proporción, permitiendo adaptar el método a escenarios más agresivos sin modificar su estructura.

Con los valores tipológicos obtenidos previamente se tiene:

- Para la armadura longitudinal $\phi = 20mm$.

$$P_{long}(mm/año) = 0.0116 * 2.30 = 0.0267 mm/año$$

- Para la armadura transversal $\phi = 10mm$.

$$P_{trans}(mm/año) = 0.0116 * 2.56 = 0.0297 mm/año$$

3.7.7 Umbrales temporales asociados a F1-F3 y criterio de gestión para F4

En el apartado 3.6 se definen los estadios F1 y F2 principalmente por superficie afectada y daños observables, mientras que el estadio F3 se define por un criterio estructural claro (perdida de sección igual o superior al 15% implicando la necesidad de refuerzo mediante CFRP). Para traducir la evolución a tiempos sin contradecir la definición original, se establecen umbrales auxiliares de pérdida de sección únicamente con finalidad temporal:

- **Estadio F1 (incipiente/preventivo): $\Delta A = 3\%$**

Este estadio representa un estado preventivo, donde el daño es incipiente y en la mayoría de los casos analizados la intervención no estaba motivada por una afección estructural sino por durabilidad o como consecuencia de un daño ajeno al proceso de la corrosión que motivo a la actuación en la estructura.

Adoptar un 3% tomando como base los resultados obtenidos en las estructuras analizadas es coherente con un escenario de corrosión aun limitada, compatible con fisuración/dicoloración y desconchones puntuales, con armaduras vista muy localizada y sin pérdida estructural apreciable. Es un valor prudente y consistente con el carácter preventivo del estadio.

- **Estadio F2 (moderado): $\Delta A = 10\%$**

Este estadio representa una degradación moderada con necesidad de reparación convencional, pero sin alcanzar el umbral estructural de refuerzo. El 10% definido se adopta como un límite auxiliar razonable por situarse por debajo del umbral de F3 (15%) y reflejar una pérdida ya significativa pero típicamente reparable sin refuerzo. Este valor, al igual que para F1 se obtiene en base a las estructuras objeto de análisis de este trabajo.

- **Estadio F3 (severo): $\Delta A = 15\%$**

Este es un criterio estructural ya definido en el apartado 3.6 asociado de manera directa con la necesidad de refuerzo CFRP debido a una pérdida de sección relevante.

- **Estadio F4 (fin de vida funcional): Sin umbral definido**

Este estadio no se define únicamente por una pérdida de sección, sino por una combinación de severidad estructural, viabilidad técnica y razonabilidad económica. Por coherencia con el enfoque de gestión del trabajo, **se interpreta como estado no deseable al que bajo ningún caso el administrador debe permitirse llegar**: Una estructura en F3 debe activar obligatoriamente la intervención para evitar evolucionar hacia un escenario de sustitución o limitación del servicio comprometiendo la seguridad de los usuarios de la línea.

3.7.8 Cálculo de la pérdida de diámetro equivalente de las barras

Para pasar de pérdida de sección ΔA a una magnitud compatible con la penetración (mm), se utiliza la relación geométrica de una barra circular donde la sección inicial es:

$$A_0 = \frac{\pi * d_0^2}{4}$$

Si la barra se corroe la nueva sección es:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Teniendo una pérdida de sección relativa de:

$$\Delta A = \frac{A_0 - A}{A_0}$$

De la cual se obtiene que la pérdida de diámetro es:

$$\Delta d = d_0 * (1 - \sqrt{1 - \Delta A})$$

Adoptando esta formulación se obtiene que:

- Para la armadura longitudinal $\varnothing = 20\text{mm}$.

$$\Delta d_{F1} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 3\%}) = 0.302 \text{ mm.}$$

$$\Delta d_{F2} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 10\%}) = 1.026 \text{ mm.}$$

$$\Delta d_{F3} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 15\%}) = 1.561 \text{ mm.}$$

- Para la armadura transversal $\varnothing = 10\text{mm}$.

$$\Delta d_{F1} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 3\%}) = 0.151 \text{ mm.}$$

$$\Delta d_{F2} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 10\%}) = 0.513 \text{ mm.}$$

$$\Delta d_{F3} = d_0 * (1 - \sqrt{1 - 15\%}) = 0.780 \text{ mm.}$$

3.7.9 Cálculo del tiempo para alcanzar F1, F2 y F3 y tiempos de transición

Una vez obtenida la pérdida de diámetro equivalente Δd para cada umbral, la penetración geométrica equivalente requerida es:

$$p = \frac{\Delta d}{2}$$

Esta relación se debe a que la penetración por corrosión se mide sobre el radio, mientras que Δd corresponde a reducción de diámetro.

En base a esto el tiempo para alcanzar un umbral se estima como:

$$t(\Delta A) = \frac{\Delta d / 2}{P_{av}}$$

- Para la armadura longitudinal $\phi = 20\text{mm}$.

$$t_{F1 \text{ long}} = \frac{0.302/2}{0.0267} = 5.65 \text{ años}$$

$$t_{F2 \text{ long}} = \frac{1.026/2}{0.0267} = 19.21 \text{ años}$$

$$t_{F3 \text{ long}} = \frac{1.561/2}{0.0267} = 29.23 \text{ años}$$

Las transiciones incrementales entre un estadio y otro serían:

$$\Delta t_{F1 \rightarrow F2} = 19.21 - 5.65 = 13.56 \text{ años}$$

$$\Delta t_{F2 \rightarrow F3} = 29.23 - 19.21 = 10.02 \text{ años}$$

- Para la armadura transversal $\phi = 10\text{mm}$.

$$t_{F1 \text{ trans}} = \frac{0.151/2}{0.0297} = 2.54 \text{ años}$$

$$t_{F2 \text{ trans}} = \frac{0.513/2}{0.0297} = 8.64 \text{ años}$$

$$t_{F3 \text{ trans}} = \frac{0.780/2}{0.0297} = 13.13 \text{ años}$$

Las transiciones incrementales entre un estadio y otro serian:

$$\Delta t_{F1 \rightarrow F2} = 8.64 - 2.54 = 6.10 \text{ años}$$

$$\Delta t_{F2 \rightarrow F3} = 13.13 - 8.64 = 4.49 \text{ años}$$

3.7.10 Tiempos tipológicos para transición entre estadios

A continuación, se muestra una tabla resumen de los tiempos obtenidos para el modelo base redondeando el periodo de transición entre estadios en favor de la seguridad sin incorporar un factor α por penetración de cloruros:

Armadura	F1 a F2 (años)	F2 a F3 (años)	F3 a F4
Ø20 longitudinal	13	10	No sobrepasar
Ø10 transversal	6	4	No sobrepasar

Nota de reescalado por ataque localizado (cloruros):

Si el inspector o gestor considera un factor α entre 4-8, los tiempos pueden ajustarse como se ha definido en el apartado 3.7.5, de manera lineal como $t_{\alpha} = t/\alpha$ manteniendo el mismo marco metodológico.

En literatura técnica se reconoce que en presencia de cloruros la corrosión de armaduras puede manifestarse de forma localizada mediante picaduras, siendo la penetración máxima local superior a la penetración media. Como se dijo, este fenómeno se suele representar mediante un factor de localización α , con valores reportados habitualmente en el intervalo de 4-8. No obstante, dado que el presente trabajo persigue desarrollar una herramienta general y aplicable en una inspección ordinaria, y que la identificación precisa del mecanismo dominante (corrosión homogénea frente a corrosión localizada) requiere información específica que no siempre está disponible en el momento de la inspección, no se ha incorporado el factor α en el cálculo base. Esta decisión evita sobredimensionar sistemáticamente la velocidad de deterioro y mantiene la coherencia del método como herramienta tipológica de gestión. En aquellos casos en los que exista evidencia clara de ataque por cloruros con corrosión localizada, el modelo puede reescalarsse de forma directa gracias a la linealidad de la formulación, ajustando los tiempos obtenidos mediante la aplicación del factor α correspondiente.

3.8 Metodología de cuantificación del coste económico y ambiental por estadio de degradación

Una vez definidos los costes unitarios y los impactos ambientales unitarios de las distintas unidades de obra asociadas a la reparación por corrosión, así como los criterios de asignación de estadios de degradación yendo desde un estadio F1 hasta un estadio F2 y finalmente los tiempos de transición entre un estadio y otro, se establece en este apartado la metodología para cuantificar el coste económico total y el impacto ambiental total asociados a cada estadio de degradación del tablero de vigas tipo π .

El objetivo de este procedimiento es proporcionar una herramienta operativa y reproducible, aplicable en el contexto de una inspección ordinaria, que permita traducir el estado observado del tablero en términos de degradación por corrosión en valores cuantificables de €/m² y kg CO₂ eq/m², facilitando así la toma de decisiones por parte del gestor de infraestructuras.

3.8.1 Principio general de cálculo

Cada estadio de degradación se asocia a un conjunto de unidades de obra, cuya contribución económica y ambiental se pondera en función de:

- La superficie afectada por la corrosión expresada como una fracción entre la superficie afectada por el fenómeno de la corrosión y la superficie total del tablero.
- La necesidad o no del empleo de CFRP para el refuerzo estructural del elemento.

De este modo el coste económico C_{Fi} y el coste ambiental E_{Fi} de cada estadio F_i se obtienen como la suma ponderada de las unidades de obra que los componen:

$$C_{Fi} = \sum_j f_j * C_j \qquad E_{Fi} = \sum_j f_j * E_j$$

Donde:

C_j y E_j son el coste económico y el impacto ambiental unitarios de la unidad de obra j .

f_j es el factor de ponderación asociado a dicha unidad, dependiente de la superficie afectada o de la geometría del elemento reparado.

Este planteamiento permite diferenciar estadios con idéntica tipología de actuación, pero distinta extensión del daño, así como incorporar de forma coherente intervenciones de carácter global o de carácter localizado.

3.8.2 Superficie afectada como variable de entrada

La superficie afectada por corrosión se expresa como una fracción expresada en porcentaje definida como:

$$\%Sup_{af} = \frac{\text{Superficie del tablero afectada por corrosion}}{\text{Superficie total del tablero}} \times 100$$

Este parámetro constituye una variable de entrada del método donde el valor de la superficie del tablero afectada por la corrosión debe ser estimado por el inspector a partir de una inspección visual in-situ y de la documentación previa disponible al momento de la inspección. Y donde por otro lado el valor de la superficie total del tablero debe ser, de igual forma estimado por el inspector tomando en cuenta que la superficie total del tablero es la definida en el apartado 3.6.3.a). El resultado, es un valor que posteriormente se introduce en los rangos característicos con el sistema de estadios previamente definido:

- Estadio F1 (incipiente): $\%Sup_{af} \leq 10\%$
- Estadio F2 (moderado): $10\% < \%Sup_{af} \leq 50\%$
- Estadio F3 (severo): No depende directamente del $\%Sup_{af}$, sino de la necesidad de refuerzo estructural asociada a una pérdida de sección de armadura igual o superior al 15%

De este modo, el método permite adaptar el cálculo a la realidad específica de cada tablero, sin imponer valores arbitrarios de superficie afectada.

3.8.3 clasificación de las unidades de obra según su alcance

A efectos de este cálculo, las unidades de obra definidas y asociadas directamente a la reparación de un tablero de hormigón armado de vigas π debido al efecto de la corrosión, se agrupan en tres categorías en función de su ámbito de aplicación:

a) Unidades dependientes de la superficie afectada

Son aquellas actuaciones directamente ligadas a la presencia localizada de corrosión y que, por tanto, se aplican únicamente sobre la superficie dañada:

- Picado mecánico de superficie de hormigón
- Chorreado de armaduras
- Aplicación manual de imprimación anticorrosiva
- Reconstrucción de sección de hormigón con mortero R4

Estas unidades se ponderan mediante el factor Sup_{af} excluyendo el valor porcentual.

b) Unidades de carácter global

Corresponden a actuaciones preventivas o de protección que se aplican de forma generalizada sobre el tablero, con independencia de la extensión puntual del daño:

- Aplicación de inhibidor de corrosión
- Pintura anticarbonatación

Estas unidades se aplican al 100% de la superficie del tablero y, por tanto, se ponderan con un factor unitario ($Sup_{af} = 1$).

c) Unidades estructurales específicas (refuerzo CFRP)

Las actuaciones de refuerzo con materiales compuestos se aplican únicamente en el estadio F3 y se ponderan en función de la geometría del tablero, distinguiendo entre:

- Malla de fibra de carbono, aplicada en caras laterales e intradós de los nervios
- Lamina de fibra de carbono, aplicado de manera exclusiva en el intradós de los nervios

La contribución de estas unidades se pondera mediante factores geométricos que presentan la proporción de dichas superficies respecto de la superficie total del tablero como se muestra en la siguiente ilustración:

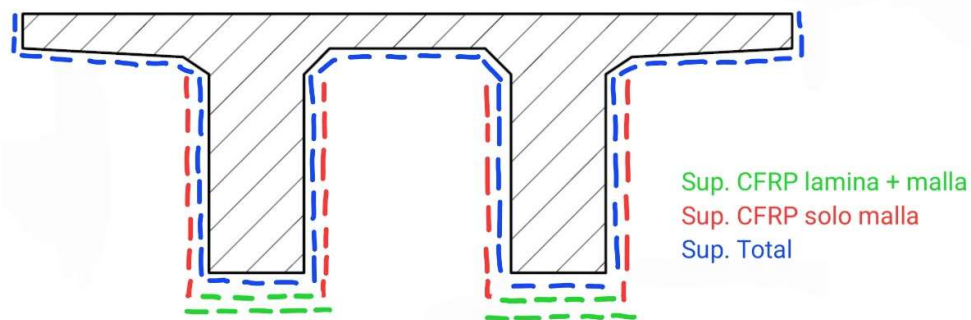


Figura 48 Superficies a tomar en cuenta al momento de ponderar el refuerzo CFRP de una viga π (elaboración propia)

En el caso donde el tablero este compuesto por dos vigas π la lógica es la misma solo que la superficie a tomar en cuenta se obtendría de la misma forma que se definió en el apartado 3.6.3.a).

3.8.4 Cuantificación por estadio de degradación

Con base en los criterios anteriores, la cuantificación del coste económico y del impacto ambiental se realiza de la siguiente forma:

- **Estadio F1 – Degradación incipiente**
Incluye actuaciones localizadas sobre la superficie afectada y medidas preventivas globales. El valor de %Sup_{af} se encuentra dentro del intervalo $\%Sup_{af} \leq 10\%$
- **Estadio F2 – Degradación moderada**
Mantiene la misma tipología de actuaciones que el estadio F1, pero con una superficie afectada mayor, comprendida entre el 10% y el 50%. El incremento de coste y del impacto ambiental se debe de manera exclusiva a la mayor extensión del daño o dicho de otra forma a una mayor %Sup_{af}
- **Estadio F3 – Degradación severa**
Este estadio, además de las actuaciones anteriores contempladas en F1 y en F2, incorpora el refuerzo estructural mediante CFRP, como consecuencia de una pérdida de sección de armaduras igual o superior al 15%. En este estadio, la superficie afectada deja de ser el parámetro determinante (aunque igual se debe tomar en cuenta) y pasa a primar la afección estructural del elemento.
- **Estadio F4 – Fin de vida funcional**
No se cuantifica ni de manera económica ni de manera medioambiental, ya que se trata de un estadio límite que debe evitarse mediante la intervención obligatoria en el estadio F3. Este es un estadio no deseable para el administrador y al que no puede permitirse llegar debido a todos los costes directos e indirectos que supone, además de la afección a la circulación y a la seguridad de los usuarios que esto supondría.

3.8.5 Integración con el análisis temporal

La metodología definida en este apartado permite obtener, para cada estadio, un coste económico y un impacto ambiental representativos del estado del tablero en el momento de la inspección. Combinando esto con los tiempos de transición entre estadios obtenidos en el apartado 3.7, esta información constituye la base para evaluar el incremento económico y ambiental asociado al retraso en la intervención, aspecto que se desarrolla y analiza en el capítulo de resultados.

4. Resultados

En los capítulos anteriores se ha desarrollado una metodología integral para evaluar el impacto económico y ambiental asociado a la corrosión de armaduras en tableros de vigas tipo π , considerando tanto la extensión del daño observable en inspección como su evolución temporal.

En particular se han definido los costes unitarios e impactos ambientales unitarios a cada una de las distintas unidades que están directamente asociadas con la reparación del elemento consecuencia del fenómeno de la corrosión, un sistema de cuatro estadios de degradación basados en criterios relevantes que a la vez son observables, objetivos y medibles. Finalmente, también se ha determinado unos tiempos medios de transición entre estadios una vez el proceso de la corrosión se ha iniciado.

El presente capítulo tiene como objetivo integrar todos estos resultados en una herramienta práctica que permita su aplicación directa en el contexto de una inspección. Para ellos se presenta una ficha de evaluación técnico, económica y ambiental que posibilita:

- La asignación del estadio de degradación del tablero (F1 a F4)
- La estimación del tiempo que supone una transición de un estadio al siguiente
- La cuantificación del coste económico e impacto ambiental asociados a la reparación de les estructura dependiendo el estadio asignado

Posteriormente, se pone esta herramienta a prueba aplicándola en un caso real y se comparan los datos obtenidos mediante el uso de la ficha con los datos de la realidad. Finalmente se discuten los resultados obtenidos y su utilidad para la toma de decisiones en la gestión de las infraestructuras.

4.1 Ficha integrada de evaluación del estado de degradación

4.1.1 Planteamiento general

El principal resultado del trabajo es la definición de una herramienta integrada de evaluación, concebida como una ficha operativa que sintetiza toda la metodología desarrollada y permite su uso directo por parte del inspector o gestor de la infraestructura. Esta herramienta traduce el estado observado del tablero en términos de corrosión, en valores cuantificables de coste económico (€/m^2), impacto ambiental ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$) y horizonte temporal de actuación (años).

La herramienta se estructura en los siguientes bloques sucesivos:

- Definición del estadio de degradación con indicadores característicos y criterios relevantes a tomar en cuenta al momento de la inspección.
- Toma y obtención de datos relevantes para la posterior asignación de un estadio al elemento estructural y estimación del coste económico e impacto ambiental que supone la intervención.

- Asignación de un estadio de degradación al elemento estructural mediante un diagrama de decisión.
- Estimación temporal de transición entre el estadio determinado y el siguiente con un posible ajuste en función de la presencia de cloruros.
- Estimación de coste económico e impacto ambiental que supone la intervención en la estructura en base al estadio asignado.

Este enfoque permite homogeneizar la toma de decisiones y reducir la subjetividad inherente a la interpretación de los daños en inspección.

En el Anexo II de este trabajo se adjuntan las fichas completas en un formato practico para trabajo en campo que serían las que el inspector o persona que realice la inspección utilizaría.

4.1.2 Definición del estadio de degradación

Previo al inicio de la inspección, se dispone de un apartado donde el inspector puede ver cada uno de los estadios de degradación, así como los indicadores característicos y criterios relevantes a evaluar in-situ para poder designar un estadio u otro al elemento estructural. Estos estadios estarían presentados de la siguiente manera:

DEFINICION DE ESTADIOS
Estadio F1 - Degradación Incipiente
Indicadores característicos Presencia de humedades y escurridos localizados Fisuras finas superficiales Desconchones/manchas puntuales sin armadura vista o con exposición localizada
Criterios relevantes *%Superficie afectada por corrosión $\leq 10\%$ **Perdida de sección en armadura longitudinal $< 15\%$
*Para determinar la superficie afectada ver apartado XX **Medido previo cepillado de la armadura

Estadio F2 - Degradación Moderada
Indicadores característicos Desconchones frecuentes con presencia de armadura vista Fisuración más desarrollada incluso con filtraciones de agua Presencia de oxido activo y delaminaciones del recubrimiento
Criterios relevantes *%Superficie afectada por corrosión $> 10\%$ y $\leq 50\%$ **Perdida de sección en armadura longitudinal $< 15\%$
*Para determinar la superficie afectada ver apartado XX **Medido previo cepillado de la armadura

Estadio F3 - Degradación Severa
Indicadores característicos Desconchones generalizados y pérdida extensa del recubrimiento Fisuras longitudinales asociadas a armaduras principales Corrosión activa con afección a armaduras longitudinales y transversales
Criterios relevantes *Pérdida de sección en armadura longitudinal $\geq 15\%$ Afección severa de cercos Necesidad de refuerzo estructural CFRP (lamina + hoja)
*Medido previo cepillado de la armadura

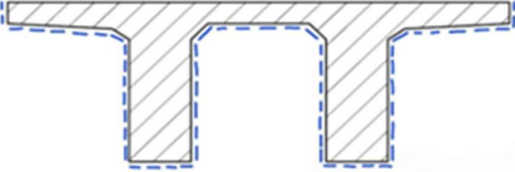
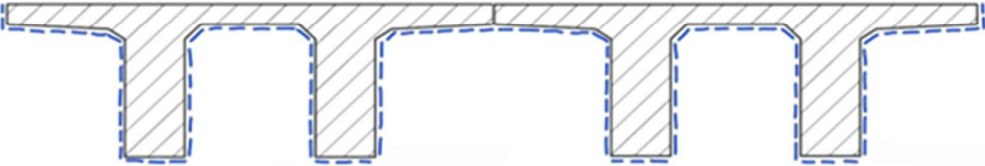
Estadio F4 - Elemento no funcional
Indicadores característicos Pérdida elevada y generalizada de sección en armaduras principales Daños generalizados en zonas críticas Afección simultánea y extensa de armadura longitudinal y transversal
Criterios relevantes %Superficie afectada por corrosión $> 50\%$ Necesidad de refuerzo estructural CFRP (lamina + hoja) Imposibilidad de garantizar la seguridad de la estructura en servicio

En base a esto el inspector ya puede evaluar y observar la estructura prestando especial atención a los indicadores y criterios definidos previamente.

4.1.3 Toma y obtención de datos relevantes para la asignación de un estadio

En la siguiente etapa el inspector procede a realizar la toma de datos que posteriormente ayudaran a definir el estadio de degradación del elemento estructural. Es importante tomar en cuenta que algunos de los datos que se debe disponer se pueden encontrar en documentación previa como informes, planos o inspecciones previas.

- Los criterios de medición de superficies a tomar en cuenta están definidos en el apartado 3.6.3.
- Habiendo obtenido los datos iniciales solo se procede al segundo recuadro si se cumple que la pérdida de sección de la armadura es $\geq 15\%$, en esta toma se tiene que tomar en cuenta el criterio de superficies definido en el apartado 3.8.3.

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION	
SUPERFICIE AFECTADA POR EFECTOS DE LA CORROSION (%)	
*(1) Superficie total del elemento =	<input style="width: 80px;" type="text"/> m ²
(2) Superficie con patologías atribuibles a la corrosión =	<input style="width: 80px;" type="text"/> m ²
(3) %Superficie afectada = $\frac{(2)}{(1)} * 100 =$	<input style="width: 80px;" type="text"/> %
*(1) Superficie total del elemento	
a) un unico tablero de viga π	
	
b) dos tableros de vigas π, sin tomar en cuenta la parte superior del tablero	
	
PERDIDA DE SECCION ARMADURA LONGITUDINAL (%)	
(4) Diametro inicial* =	<input style="width: 80px;" type="text"/> mm.
(5) Diametro actual** =	<input style="width: 80px;" type="text"/> mm.
(6) %Perdida de seccion = $\left[1 - \left(\frac{(5)}{(4)} \right)^2 \right] * 100 =$	<input style="width: 80px;" type="text"/> %
*Obtenido de documentacion previa/planos/informes	
**Previo cepillado	

4.1.4 Asignación de un estadio de degradación mediante un árbol de decisión

Habiendo obtenido los datos relevantes, el inspector se puede basar en estos y en el siguiente diagrama para determinar el estadio de degradación del elemento estructural:

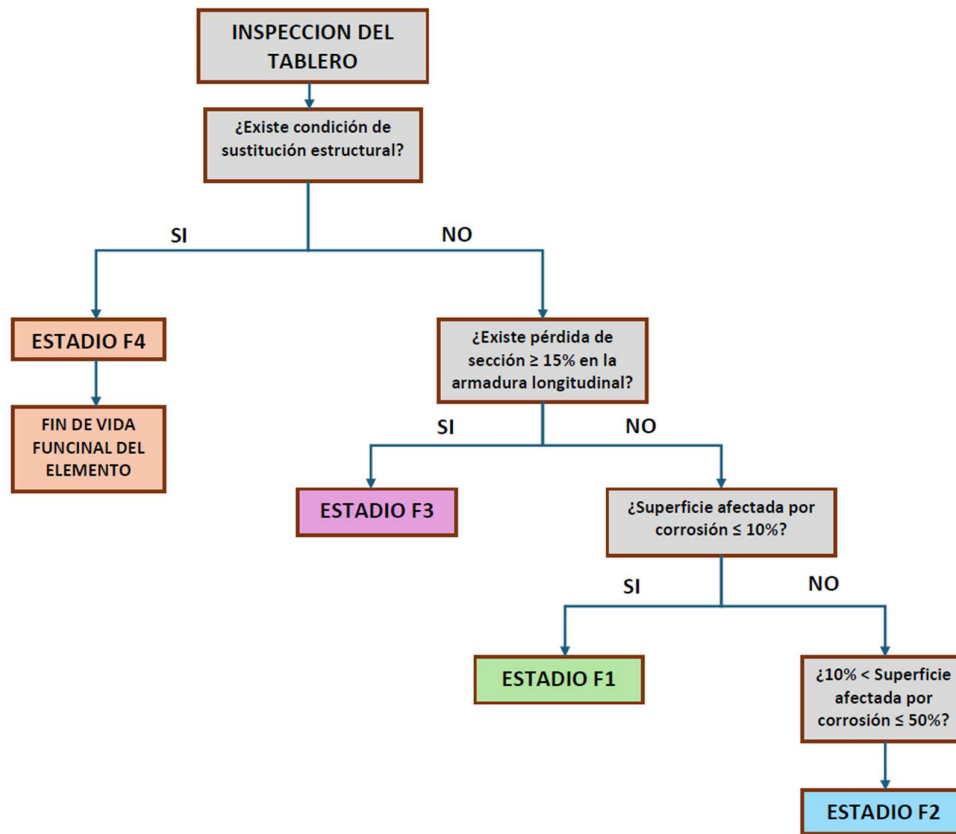


Figura 49 Árbol de decisión para la asignación del estadio de degradación (elaboración propia)

4.1.5 Estimación temporal de transición entre el estadio determinado y el siguiente

Habiendo definido el estadio de degradación ya es posible determinar el tiempo promedio que transcurriría para que el estadio de degradación determinado pase al siguiente. En caso de que se decida no actuar esto supondría un incremento tanto de costes económicos como en el impacto ambiental, consecuencia del retraso en caso de que se decida no intervenir en la estructura.

Armadura	F1 a F2 (años)	F2 a F3 (años)	F3 a F4*
Ø20 longitudinal	14	10	No sobrepasar
Ø10 transversal	6	5	No sobrepasar

*Si el elemento se encuentra en un estadio F3 la intervención es prioritaria

Como se observa y se ha definido en el apartado 3.7 la estimación se hace en base a unos diámetros usuales en esta tipología de elemento estructural y siguiendo los criterios establecidos en el apartado 3.7.5 se añade una nota a pie de la ficha donde, si se considera que el elemento estructural está expuesto a un ambiente que favorece el ataque por cloruros es posible establecer un factor α , a criterio del inspector o del administrador, que divide este tiempo haciendo que la transición entre un estadio y otro se produzca en un periodo más corto de tiempo.

4.1.6 Valoración del coste económico e impacto ambiental de la intervención en base al estadio de degradación

Finalmente, se cuenta en la ficha con dos tablas. La primera contiene el coste en (€/m^2) de todas las unidades asociadas a la reparación del elemento consecuencia de la corrosión y la segunda contiene el impacto ambiental que generaría la intervención medida en Potencial de Calentamiento Global ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$).

Tomando como base las tablas, los datos de las superficies obtenidos en el apartado 4.1.3 y el estadio de degradación asignado se obtiene tanto el coste unitario que supondría reparar la estructura (€/m^2) como el coste total de la reparación. Por otro lado, se obtiene lo mismo en términos de Potencial de Calentamiento Global.

Ficha para la valoración del coste económico:

TABLA DE COSTE ECONOMICO

Unidad	Actuación	Precio unitario (€/m ²)
CE1	Picado mecánico de superficie de hormigón	39.39
CE2	Chorro de armaduras	14.85
CE3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	12.65
CE4	Reconstrucción con mortero R4	129.77
CE5	Inhibidor de corrosión	48.86
CE6	Pintura anticarbonatación	13.70
CE7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	1558.17
CE7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	138.38

Para estimar el coste total de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada ≤10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 + (9) x CE7.1 + (10) x CE7.2 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El coste de la intervención no depende unicamente de las actuaciones a realizar, sino tambien de las afecciones a la circulacion, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Ficha para la valoración del impacto ambiental:

TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Unidad	Actuación	*PCG (kg CO2 eq/m2)
IA1	Picado mecánico de superficie de hormigón	3.82
IA2	Chorro de armaduras	2.19
IA3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	2.57
IA4	Reconstrucción con mortero R4	19.58
IA5	Inhibidor de corrosión	0.37
IA6	Pintura anticarbonatación	1.26
IA7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	54.76
IA7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	5.52

*Potencial de Calentamiento Global

Para estimar el impacto ambiental de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada ≤10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 + (9) x IA7.1 + (10) x IA7.2 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El impacto ambiental de la intervención no depende unicamente de las actuaciones a realizar, sino tambien de las afecciones a la circulacion, falta de garantia de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios	

5. Validación de propuesta: Metodología por aplicación a casos reales

Habiendo definido la ficha mediante la cual se puede valorar el coste económico e impacto ambiental de un tablero de vigas π de hormigón armado. En este apartado se propone hacer uso de esta en un caso real ya ejecutado dentro de la misma campaña de lotes y comparar el coste económico que se obtendría con el uso de esta ficha y el coste real que ha implicado la reparación del elemento estructural en base a la certificación a fin de obra de dicha estructura.

De esta manera se puede ver si el modelo definido se adapta y es acorde a la realidad en cuanto a coste económico se refiere. La evaluación del impacto ambiental no es comparable al no haberse hecho una inicial en el momento de la intervención en dicha estructura.

Con el fin de validar aún más la herramienta propuesta se aplica el mismo proceso en dos casos adicionales, ubicados en el anexo III del presente trabajo.

5.1 Caso real: Paso inferior sobre la carretera CR-502. Línea Puertollano-Refinería P.K. 3+075

5.1.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta

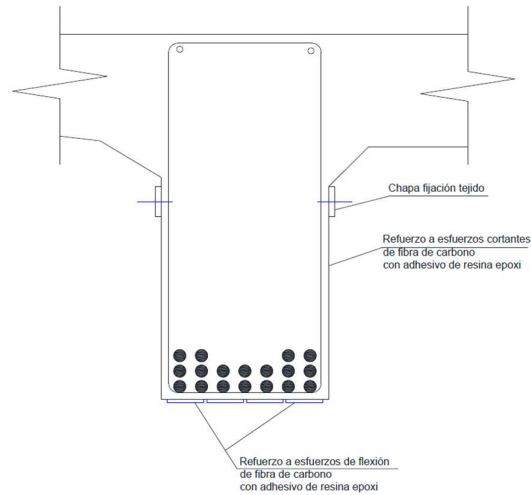
La estructura que se utiliza para realizar la evaluación es el Paso Inferior sobre la carretera CR-502, de la Línea Puertollano-Refinería en el PK 3+075. Esta estructura es un puente recto, soporta una única vía con trazado en recta reparado en el año 2019 (dato importante para la posterior actualización del coste económico y correcta comparabilidad de precios frente al modelo que utiliza la BPA de 2025).

La estructura se compone de un tablero de hormigón armado formado por una única viga de sección en π , de 9,10 m de luz, con una anchura estimada de 5,30 m. Los estribos se componen de muros de frente rectos y cerrados de fábrica de mampostería, con una anchura similar a la del tablero, y una altura de 5,80 m.

Los frentes se prolongan lateralmente de forma retranqueada con aletas de alzado triangular, con longitudes aproximadas de 11,50 m, si bien se extienden más allá con petos de altura reducida paralelamente a la carretera. Superiormente se ven rematados por un zuncho de hormigón a modo de coronación.

Los trabajos realizados para poner freno al deterioro que sufría la estructura y devolverla a un buen estado de conservación han sido los siguientes:

- Saneamiento, repicado, limpieza y protección de la armadura y recomposición de elementos de hormigón armado.
- Refuerzo de vigas con fibra de carbono a flexión y a cortante. Consistiendo en 4 laminados en doble capa por cada cara inferior de las vigas para el refuerzo a flexión y de tejidos de fibras de carbono “abrazando” el desarrollo de la viga (laterales y cara inferior) como se muestra a continuación:



- Aplicación de un sistema de protección a toda la estructura que consiste en la aplicación de inhibidor de corrosión y una capa de pintura anticarbonatación en los paramentos de hormigón.

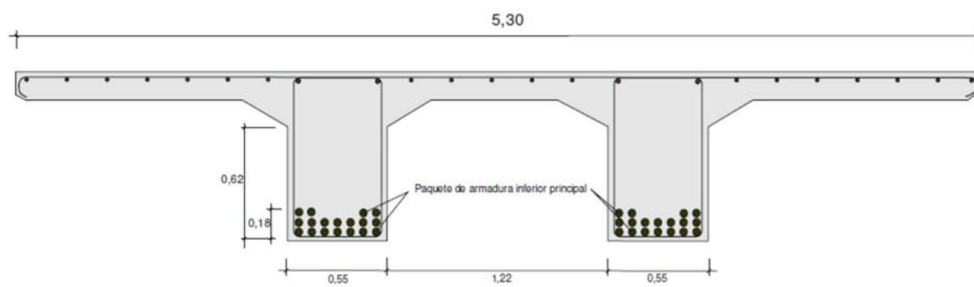
Estado previo a reparación



Estado posterior a reparación



Sección transversal del tablero tipo π



5.1.2 Coste económico real de la intervención

A continuación, se muestra una tabla correspondiente a la relación valorada una vez finalizada la obra donde se puede ver que el coste total de estas actuaciones es de 28.439,43€.

UD	Actuación	Medición					Precio unitario	Total
		Num.	Largo	Ancho	Alto	Total		
m2	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	0.5	10.1	9.85	1.00	49.74	38.76 €	1,928.02 €
m2	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	1	10.1	9.85	1.00	99.48	11.18 €	1,112.24 €
m2	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	0.5	10.1	9.85	1.00	49.74	13.91 €	691.92 €
m2	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m2 por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm2, y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	0.5	10.1	9.85	1.00	49.74	102.23 €	5,085.18 €
m2	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasa la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm2, no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m2, previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	1	10.1	9.85	1.00	99.48	39.76 €	3,955.52 €
m2	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m2 en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	1	10.1	9.85	1.00	99.48	10.97 €	1,091.35 €

m2	Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm2, módulo elástico >2000 N/mm2 y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	16	9.1	1	1.00	145.6	85.05 €	12,383.28 €
m2	Hoja de fibra de carbono unidireccional en O o en U, de 500 mm de ancho y 0,227 mm de espesor (450g/m2), de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, del tipo MasterBrace FIB CF230/4900-450/25 de BASF o similar para refuerzo de vigas a cortante; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi tipo MasterBrace P3500 de BASF o similar, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm2, módulo elástico >2000 N/mm2 y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, tipo MasterBrace SAT 4500 de BASF o similar, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Medida la longitud ejecutada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, gestión de residuos y productos sobrantes (incluido canon a planta o vertedero), control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	32	1.95	0.3	1.00	18.72	117.09 €	2,191.92 €
							TOTAL	28,439.43 €

5.1.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)

Para garantizar la comparabilidad entre los costes reales de la intervención ejecutada en el año 2019 y los costes estimados mediante la Base de Precios de ADIF con valores actualizados a 2025, se realiza la actualización de los precios mediante el Índice de Precios al Consumo (IPC) publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

La aplicación del IPC en este contexto permite trasladar los costes de una actuación ejecutada en un momento determinado a valores monetarios equivalentes en un año posterior, eliminando el efecto de inflación acumulada.

De acuerdo con los datos oficiales del INE, la variación anual del IPC general en España ha sido aproximadamente la siguiente:

Año	Variación IPC (%)
2020	1.1%
2021	0.5%
2022	6.1%
2023	5.9%
2024	3.4%
2025	2.9%

Tabla 13 Variaciones del Índice de Precios al Consumo (INE, 2025)

A partir de estas variaciones anuales y aplicando el incremento acumulado de manera compuesta al coste de la reparación en el año 2019 de 28,439.43€ se obtiene un coste actualizado a 2025 de 34,544.01€

Este ajuste permite realizar una comparación más coherente entre el coste real de la intervención y los costes estimados mediante la herramienta desarrollada en este trabajo, eliminando el efecto de la inflación y centrando la comparación en la consistencia del modelo propuesto.

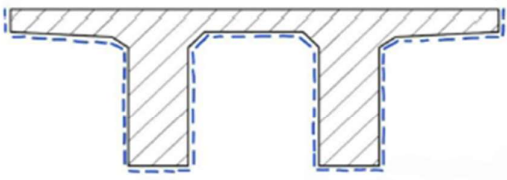
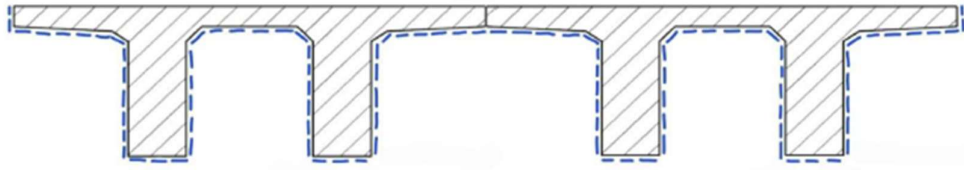
5.2 Aplicación de la ficha del estado de degradación

Por otro lado, se procede a rellenar la ficha integrada de evaluación del estado de degradación adjunta en el Anexo II como si fuera una inspección realizada en campo y se obtienen los siguientes resultados:

Nombre estructura: Paso inferior sobre la carretera CR-502

FICHA N°2

Fecha de inspección: XX/XX/XX

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION	
SUPERFICIE AFECTADA POR EFECTOS DE LA CORROSION (%)	
* (1) Superficie total del elemento =	99.48 m ²
(2) Superficie con patologías atribuibles a la corrosión =	49.74 m ²
(3) % Superficie afectada = $\frac{(2)}{(1)} * 100 =$	50.00%
* (1) Superficie total del elemento	
a) un unico tablero de viga π	
	
b) dos tableros de vigas π, sin tomar en cuenta la parte superior del tablero	
	
PERDIDA DE SECCION ARMADURA LONGITUDINAL (%)	
(4) Diámetro inicial* =	30 mm.
(5) Diámetro actual** =	16 mm.
(6) % Pérdida de sección = $\left[1 - \left(\frac{(5)}{(4)} \right)^2 \right] * 100 =$	71.50%
* Obtenido de documentación previa/planos/informes	
** Previo cepillado	

Nombre estructura: Paso inferior sobre la carretera CR-502
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA N°2

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION		
SOLO PROCEDER SI (6) ≥ 15%		
SUPERFICIE A REFORZAR CON CFRP (refuerzo con fibra de carbono)		
(7) Superficie donde se dispone CFRP lamina + malla*, unicamente en la cara inferior de los nervios que lo requieran		10.01 m ²
(8) Superficie donde se dispone CFRP solo malla**, unicamente en las caras laterales de los nervios que lo requieran		22.57 m ²
(9)%Superficie CFRP lamina + malla	$= \frac{(7)}{(1)} * 100 =$	10.06%
(10)%Superficie CFRP solo malla	$= \frac{(8)}{(1)} * 100 =$	22.69%
* Disposición de CFRP lamina + malla unicamente en cara inferior de nervios		
**Disposición CFRP solo malla en las caras laterales de nervios		
*** Si la estructura esta compuesta por dos tableros de vigas π se calcula en relación a la superficie definida en *(1)b)		

Nombre estructura: Paso inferior sobre la carretera CR-502
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA N°4

VALORACION DEL COSTE ECONOMICO DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE COSTE ECONOMICO

Unidad	Actuación	Precio unitario (€/m ²)
CE1	Picado mecánico de superficie de hormigón	39.39
CE2	Chorro de armaduras	14.85
CE3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	12.65
CE4	Reconstrucción con mortero R4	129.77
CE5	Inhibidor de corrosión	48.86
CE6	Pintura anticarbonatación	13.70
CE7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	1558.17
CE7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	138.38

Para estimar el coste total de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada ≤10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 + (9) x CE7.1 + (10) x CE7.2 =	<input type="text"/> 349.040324 (€/m ²)
Coste total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> 34722.53 €	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+mallá, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo mallá, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El coste de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar y tomando como referencia los datos obtenidos de la ficha el coste de intervenir en esta estructura es de 34,722.53€.

5.3 Conclusiones en cuanto al impacto económico

Comparando el coste real proveniente de la relación valorada a fin de obra de 28.439,43€, actualizada mediante el IPC a 34,544.01€ y el coste proveniente de la ficha de 34,722.53€ se puede ver que son costes similares.

Tomando en cuenta que la reparación de la estructura se realizó en 2019 en base a una tabla de precios de esa época y que la ficha está basada en la BPA de ADIF a 2025, se ve que hay una diferencia de 6 años en la que los precios de cada unidad de obra se han ajustado al alza. Por lo que es razonable que haya un incremento de coste de 6.283,10€ o del 22% en términos porcentuales.

Por otro lado, se puede ver que, en base a los criterios de los estadios definidos, esta estructura está claramente situada en el estadio F3. Por lo que es imprescindible la actuación en la misma para evitar la transición hacia el estadio F4.

Finalmente, si bien hay un incremento del 22% entre el coste de reparación real y el coste de reparación obtenido de la ficha este incremento se debe a la diferencia entre bases de precios, se puede ver que la ficha da un orden de magnitud real y útil para que el tomador de decisiones pueda valorar lo que implica intervenir en dicha estructura y yendo más allá del coste económico el tomador de decisiones puede ver que la estructura se encuentra en un estadio de degradación F3 por lo que es imprescindible actuar para evitar la transición a un estadio F4 que se debe evitar a toda costa.

5.4 Consideraciones sobre la validación del impacto ambiental

A diferencia de la validación económica, en la que ha sido posible comparar los costes estimados por el modelo con los costes reales de una intervención ejecutada, la validación del impacto ambiental presenta limitaciones inherentes a la disponibilidad de información previa.

Los casos de estudio analizados no disponen de información suficientemente detallada sobre los materiales empleados, cantidades de productos utilizados, consumos energéticos o características específicas de los sistemas de reparación aplicados. Esta información es esencial para poder reconstruir de forma rigurosa el impacto ambiental real de la intervención.

La ausencia de este tipo de registros es una situación relativamente habitual en actuaciones de mantenimiento ejecutadas en años previos, donde la documentación técnica se centra en aspectos constructivos y económicos, sin incluir indicadores ambientales cuantificados.

No obstante, esta limitación pone de manifiesto una de las principales aportaciones de esta herramienta. Ya que, hasta el momento, las decisiones acerca de la intervención en estructuras deterioradas se basan fundamentalmente en criterios técnicos y económicos, sin disponer de herramientas que permitan estimar de forma sistemática el impacto ambiental asociado a las diferentes estrategias de actuación.

La metodología propuesta introduce un marco cuantitativo para estimar el impacto ambiental de las intervenciones de reparación, expresado en términos de potencial de calentamiento global, a partir de factores de emisión y Declaraciones Ambientales de Producto asociadas a las unidades de obra consideradas.

Desde esta perspectiva, más que constituir una debilidad del modelo, la imposibilidad de validar el impacto ambiental frente a intervenciones pasadas que carecen de información al respecto, pone en relieve la ausencia de indicadores ambientales en ciertas actuaciones de mantenimiento.

5.5 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta

Si bien, como se ha establecido en el anterior apartado no es posible validar el modelo mediante la comparación entre el impacto ambiental realmente producido al momento de intervenir en la estructura y el impacto ambiental que se obtendría mediante el uso de la ficha. Se procede a obtener el impacto ambiental utilizando esta herramienta para tener un orden de magnitud de lo que esta intervención implicaría en base a las premisas establecidas para la valoración del impacto ambiental en potencial de calentamiento global (kg CO₂ eq).

Nombre estructura: Paso inferior sobre la carretera CR-502
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA Nº4

VALORACION DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Unidad	Actuación	*PCG (kg CO2 eq/m2)
IA1	Picado mecánico de superficie de hormigón	3.82
IA2	Chorro de armaduras	2.19
IA3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	2.57
IA4	Reconstrucción con mortero R4	19.58
IA5	Inhibidor de corrosión	0.37
IA6	Pintura anticarbonatación	1.26
IA7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	54.76
IA7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	5.52

*Potencial de Calentamiento Global

Para estimar el impacto ambiental de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada ≤ 10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 + (9) x IA7.1 + (10) x IA7.2 =	<input type="text"/> 22.47 (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> 2235.45 kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El impacto ambiental de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar el impacto ambiental total de esta intervención expresado en potencial de calentamiento global es de 2,235.45 kg de CO₂ eq.

Con el objetivo de dimensionar la magnitud de lo que implica el hecho de que una estructura se repare en un estadio temprano como ser el F2 en vez de que se intervenga en un estadio F3 se ha simulado en la misma estructura y con la misma superficie afectada el impacto ambiental en caso de que no se necesite un refuerzo estructural CFRP y se obtuvo que el impacto ambiental expresado en potencial de calentamiento global es igual a 1,562.83 kg de CO₂ eq evidenciando que la necesidad de uso de un refuerzo estructural supone un incremento de 672.62 kg de CO₂ eq o lo que sería un incremento en el potencial de calentamiento global de un 43% en términos porcentuales.

5. Validación de propuesta: Metodología por aplicación a casos reales

6. Sostenibilidad

6.1 Enfoque general: Sostenibilidad en la gestión de infraestructuras ferroviarias

En un contexto actual de transición ecológica y descarbonización de la economía, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje estratégico en la planificación, diseño, construcción y gestión de las infraestructuras. A nivel Europa, las políticas establecen la necesidad de reducir de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al sector de la construcción y mantenimiento de infraestructuras.

En base a esto, las infraestructuras ferroviarias que tradicionalmente han sido consideradas como un medio de transporte ambientalmente favorable frente a otras alternativas, no son ajenas a este reto. Y si bien este medio de transporte presenta ventajas frente a otros, la construcción, mantenimiento y rehabilitación de sus estructuras implican consumos relevantes de materiales y energía, dando como resultado la generación de emisiones de CO₂.

En el marco de este trabajo, la sostenibilidad no solo se entiende como la reducción de impactos en la fase de construcción de nuevas infraestructuras, sino también como la optimización del mantenimiento y prolongación de la vida útil de las estructuras que ya existen, evitando intervenciones innecesarias o sobredimensionadas y minimizando actuaciones correctivas de gran calibre.

6.2 Integración del impacto ambiental en la toma de decisiones

En general, cuando se habla de gestionar el deterioro de las estructuras los criterios utilizados se apoyan principalmente en la parte técnica y económica del problema. Sin embargo, en la mayoría de los modelos de decisión convencionales, la variable ambiental no se incorpora de manera cuantificada, quedando relegada a consideraciones cualitativas.

Dentro del contexto de este trabajo, el impacto ambiental se introduce como una magnitud cuantificable y objetiva, expresada en términos de potencial de calentamiento global (kg CO₂ eq.) asociado a cada unidad de obra necesaria para la reparación por corrosión. A partir del análisis de los descompuestos en la BPA y fichas DAP, se ha determinado el impacto unitario de todas y cada una de las actuaciones de reparación y lo que implican.

Este enfoque permite asignar a cada estadio de degradación (F1-F4), aparte de un coste económico, un impacto ambiental. De esta manera se integran ambas dimensiones en una única herramienta de evaluación.

La principal aportación de este trabajo en materia de sostenibilidad radica en que el impacto ambiental no se evalúa de forma aislada, sino en relación con el momento de la intervención. Demostrando que el retraso en la actuación frente a la corrosión no solo incrementa el coste económico, sino también la huella de carbono asociada a dicha reparación.

6.3 Retraso en la intervención y aumento del impacto ambiental

Uno de los resultados más relevantes de este trabajo es la evidencia de que la transición entre estadios de degradación implica un incremento progresivo en la intensidad material y energética de las intervenciones de reparación.

También se puede observar como en los estadios iniciales (F1 y F2), las actuaciones se centran fundamentalmente en reparaciones localizadas y tratamientos preventivos con un consumo relativamente moderado de materiales y energía. Mientras que en los estadios más tardíos (F3 y F4) las intervenciones necesitan un nivel de intervención mayor, implicando más uso de materiales y actuaciones más extensas, traduciéndose en un incremento notable del impacto ambiental.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad este planteamiento tiene implicaciones claras:

- Intervenir de manera temprana en una estructura por lo general no solo reduce el coste económico sino también las emisiones asociadas.
- La intervención tardía en una estructura genera una penalización ambiental que se acumula a través del tiempo.
- La prevención y el mantenimiento proactivo constituyen estrategias de reducción de las emisiones de CO₂.

Dicho planteamiento se alinea con los principios de la economía circular, donde la prolongación de la vida útil de las estructuras y la minimización del consumo de recursos son objetivos primordiales.

6.4 Herramienta para la gestión sostenible del patrimonio

La herramienta que se desarrolla en el capítulo 3 y 4 permite al administrador de infraestructuras:

- Asignar un estadio de degradación de manera objetiva
- Cuantificar el coste económico asociado
- Determinar el impacto ambiental en kg CO₂ eq/m²
- Estimar el tiempo disponible antes de la transición al siguiente estadio

Esto supone una herramienta útil al momento de la toma de decisiones basada no solo en criterios de seguridad y presupuesto sino también en criterios ambientales.

Desde un punto de vista estratégico para el decisor esta herramienta ayuda a priorizar intervenciones con mayor retorno ambiental, justificar inversiones preventivas frente a actuaciones correctivas tardías, incorporar indicadores ambientales en planes de conservación y alinear la gestión del mantenimiento con los compromisos de reducción de emisiones.

6.5 Alineación con las políticas europeas y alcance del análisis ambiental desarrollado

El enfoque de este trabajo se considera coherente con las tendencias actuales en materia de evaluación ambiental de infraestructuras, donde cada vez adquieren mayor relevancia los análisis de ciclo de vida, la cuantificación de emisiones embebidas en materiales y la incorporación de indicadores ambientales en la contratación pública.

Si bien es importante señalar que el presente trabajo no pretende constituir una herramienta de evaluación ambiental integral ni un análisis completo de ciclo de vida (ACV), si establece una base metodológica para integrar el impacto ambiental en decisiones de mantenimiento estructural, abriendo la puerta a futuras ampliaciones que consideren otras categorías de impacto, fases de ciclo de vida o incluso estrategias de optimización multiobjetivo.

En línea con lo mencionado, se puede ver que el trabajo no solo cuantifica de manera puntual las emisiones consecuencia de la reparación de una estructura, sino que introduce una lógica de gestión en la que la sostenibilidad se convierte en un criterio operativo y medible.

6.6 Conclusión del enfoque sostenible

En base a lo mencionado anteriormente se concluye que el presente trabajo se fundamenta en los siguientes pilares de sostenibilidad:

- Se incorpora de manera explícita el impacto ambiental en la evaluación de la degradación de una estructura para una posible futura intervención de reparación.
- Se demuestra que el retraso en la intervención por corrosión por lo general incrementa no solo el coste económico, sino también ambiental.
- Se crea una herramienta practica que permite integrar criterios técnicos, económicos y ambientales en la toma de decisiones.
- Se introduce una lógica de gestión y toma de decisiones en la que la sostenibilidad se convierte en un criterio operativo y medible.

De este modo este trabajo, aparte de centrarse en un análisis puramente técnico y económico, se sitúa en el ámbito de la gestión sostenible de infraestructuras, contribuyendo a una planificación más eficiente, responsable y alineada con los objetivos de reducción de emisiones y optimización de recursos en el sector ferroviario.

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1 Síntesis de hallazgos principales

El presente trabajo ha desarrollado una metodología integral para evaluar el impacto económico y ambiental asociado al retraso en la intervención frente a la corrosión de armaduras en tableros de vigas tipo π en infraestructuras ferroviarias. Se ha tomado como base del análisis casos reales y se han integrado criterios técnicos, económicos, ambientales y temporales obteniendo los siguientes hallazgos relevantes:

- La corrosión de armaduras es la patología dominante en estructuras ferroviarias de hormigón armado, siendo esta la responsable de gran parte de las intervenciones de reparación estructural. Su evolución progresiva la convierte en un factor crítico para la gestión del patrimonio estructural, más aun sabiendo que las primeras etapas que constituyen el periodo de iniciación de esta patología no son fácilmente detectables.
- Se ha definido un sistema de cuatro estadios (F1-F4) basado en criterios observables, medibles y objetivos en una inspección, así como en umbrales estructurales claros y definidos, particularmente cuando se trata de la pérdida de sección de la armadura longitudinal principal igual o superior al 15%, asociada a la necesidad de utilizar refuerzo estructural (CFRP). Este sistema permite traducir la condición real del tablero en un estado técnico homogéneo y reproducible.
- Se ha cuantificado de forma sistemática los costes económicos (€/m²) y los impactos ambientales (kg CO₂ eq/m²) de las unidades de obra asociadas a la reparación por corrosión, permitiendo asignar a cada estadio un valor agregado representativo.
- Se ha establecido un espacio temporal de evolución del proceso de la corrosión y transición de un estadio a otro mediante la aplicación combinada del modelo de Li2004a y del Anejo 12 del Código Estructural, facilitando así la toma de decisiones para el gestor.
- El hecho de integrar todos los elementos previamente mencionados en una herramienta/ficha operativa de evaluación permite a la persona que va a inspeccionar la estructura determinar de forma estructurada el estadio de degradación del tablero, el coste económico asociado, el impacto ambiental correspondiente y el horizonte temporal de transición entre un estadio y el siguiente.
- Como se mencionó en el apartado anterior, queda demostrado que el retraso en la intervención no solo incrementa el coste económico, sino que también aumenta el impacto ambiental de la actuación de reparación necesaria, especialmente en el paso al estadio F3 donde se incorpora el sistema de refuerzo estructural mediante fibra de carbono (CFRP).

En conjunto el trabajo aporta una herramienta practica orientada a la gestión, que permite cuantificar el coste de no actuar a tiempo, tanto en términos económicos como ambientales sobre una estructura.

7.2 Aportación del trabajo

La aportación del trabajo radica en la integración de cuatro dimensiones tradicionalmente analizadas de forma separada.

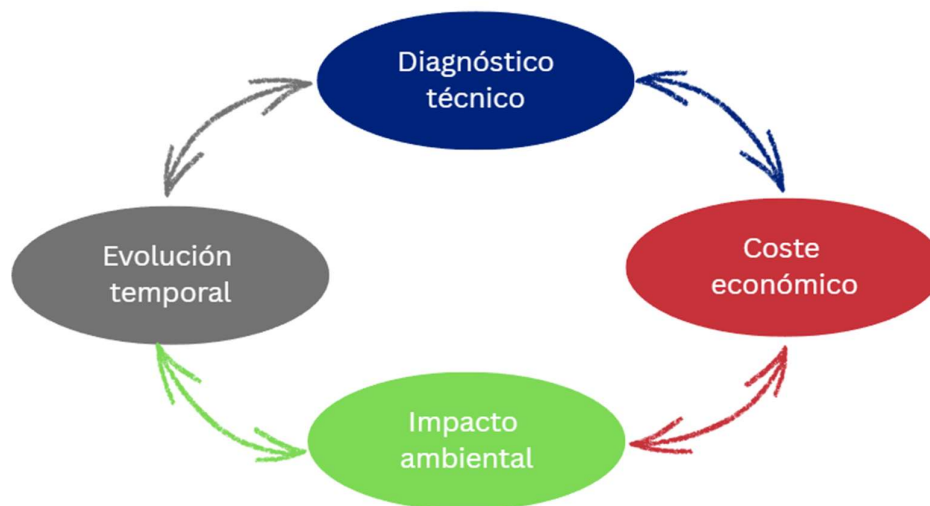


Figura 50 Cuatro dimensiones a tomar en cuenta para la toma de decicion. Elaboración propia.

Estas cuatro dimensiones introducen una visión más amplia, alineada con los principios actuales de sostenibilidad y gestión eficiente de infraestructuras, frente a enfoques centrados exclusivamente en la seguridad estructural o en el coste directo de intervención.

Por otro lado, se destaca de este trabajo su enfoque aplicado basado en el análisis de estructuras reales pertenecientes a campañas del gestor, lo que ha permitido calibrar los umbrales y evitar planteamientos puramente teóricos.

7.3 Implicaciones para la gestión del mantenimiento y conservación de infraestructuras

Uno de los aspectos más relevantes es la utilidad que la herramienta desarrollada puede tener para los gestores de mantenimiento y conservación de infraestructuras, especialmente en redes donde el número de estructuras es elevado y los recursos disponibles para intervención son limitados.

En este contexto, una de las principales dificultades a las que se enfrentan los responsables de mantenimiento no es únicamente detectar el deterioro estructural, sino la priorización de

las actuaciones entre múltiples estructuras que presentan distintas situaciones, niveles de urgencia y consecuencias potenciales.

Como se mencionó anteriormente, las cuatro dimensiones permiten transformar una observación técnica obtenida en inspección en información directamente útil para la planificación del mantenimiento.

Desde el punto de vista de la gestión de activos esto se traduce en múltiples aplicaciones prácticas. Por ejemplo, ante la necesidad de decidir entre intervenir en diferentes estructuras dentro de una misma red – como podría ser la reparación de un paso inferior, un puente o una estación – la herramienta permite valorar y priorizar aquellas estructuras que se encuentren más próximas a alcanzar estadios críticos.

En la misma línea, el modelo permite identificar situaciones en las que una intervención relativamente temprana puede evitar incrementos significativos de coste en el futuro, facilitando decisiones de mantenimiento preventivo frente a estrategias de intervención tardía. Esta capacidad resulta importante especialmente en programas de conservación donde el presupuesto disponible obliga a seleccionar cuidadosamente qué actuaciones se ejecutan en cada periodo.

Otra aplicación relevante se relaciona con la planificación temporal de las intervenciones. Ya que la estimación del tiempo medio de transición entre estadios permite a los gestores disponer de una referencia aproximada del margen disponible antes de que el deterioro alcance un nivel que implique actuaciones más intensivas. De esta manera, la herramienta permite anticipar la evolución probable del deterioro en el tiempo, facilitando la programación de intervenciones dentro de planes plurianuales de mantenimiento.

En conclusión, con lo referente a los gestores y tomadores de decisiones, la principal aportación de esta herramienta no reside únicamente en su capacidad para clasificar el estado de degradación de una estructura, sino en su potencial para transformar la información obtenida en inspección en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, dando pie a una gestión más eficiente, anticipativa y sostenible del patrimonio estructural ferroviario.

7.4 Limitaciones del estudio

Al ser un modelo simplificado aplicado a sistemas reales complejos, la metodología presenta determinadas limitaciones que deben ser consideradas:

- Alcance tipológico limitado: El trabajo se ha centrado de manera exclusiva en tableros de vigas π de hormigón armado, sin extender el análisis a otros elementos estructurales como pilas, estribos, cimentaciones o tableros de otra forma y tipología.
- Generalización de soluciones de reparación: La herramienta asume actuaciones de reparación típicas en este tipo de elemento estructural. No toma en cuenta actuaciones específicas que puedan surgir de un análisis individual y específico del elemento, considerando también su emplazamiento, condiciones ambientales específicas, etc.

- Simplificación ambiental: El análisis del impacto ambiental se ha centrado en el potencial del calentamiento global, sin considerar otras categorías de impacto (acidificación, consumo de recursos, etc.)
- Modelo temporal tipológico: Los tiempos de transición se han estimado a partir de valores representativos y no mediante una modelización individualizada para cada estructura en específico, lo que implica una aproximación real y no específica.
- Hipótesis de comportamiento homogéneo: El modelo base no incorpora la variabilidad asociada a fenómenos de corrosión localizada por cloruros más allá de la posibilidad de ajuste mediante el factor α .
- Dependencia de la calidad de inspección: La correcta aplicación de la herramienta requiere una estimación adecuada de los valores de entrada como la superficie total, la superficie afectada o la pérdida de sección del acero, si no se ejecutan estas mediciones con rigor se introduce un nivel de incertidumbre en el modelo.

Si bien estas limitaciones están presentes, no invalidan la metodología, sino que delimitan su ámbito de aplicación y constituyen oportunidades de mejora futura.

7.5 Futuras líneas de investigación

A partir del trabajo desarrollado se identifica una serie de líneas de futura investigación que podrían ampliar y profundizar los resultados obtenidos:

- Extender la metodología a otros elementos estructurales como pilas, estribos, losas macizas, etc.
- Adaptar el modelo a otras tipologías y materiales, como ser estructuras metálicas, de fábrica, apoyos de neopreno e incorporando mecanismos de deterioro propios de cada material
- Desarrollo de un análisis de ciclo de vida completo integrando otras categorías de impacto ambiental y considerando fases de transporte, puesta en obra y fin de vida.
- Incorporación de variabilidad e incertidumbre asociadas a los parámetros del modelo temporal mediante enfoques estocásticos o de fiabilidad estructural.
- Desarrollar y digitalizar una herramienta digital o aplicación integrada en plataformas de gestión de activos que permita su uso automatizado a escala de red.

Dichas líneas de trabajo permitirían evolucionar una herramienta tipológica a un sistema integral de apoyo a la decisión en la gestión sostenible de infraestructuras.

7.6 Reflexión final

La gestión del patrimonio estructural ferroviario se enfrenta al desafío de mantener niveles elevados de seguridad y servicio en un contexto de recursos limitados y crecientes exigencias ambientales. Desde este punto de partida, actuar de forma reactiva ante daños avanzados no resulta sostenible desde el punto de vista económico y ambiental.

El presente trabajo muestra que es posible traducir el estado de degradación por corrosión en indicadores cuantificables que permiten anticipar decisiones y evaluar el coste de la inacción. En paralelo, incorporar la dimensión ambiental al análisis económico tradicional no solo responde a una exigencia política o normativa, sino que constituye una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia en la gestión.

En definitiva, la metodología desarrollada no pretende ofrecer una solución definitiva al problema de la corrosión en infraestructuras, sino aportar un marco estructurado que facilite una toma de decisiones más informada, transparente y alineada con los principios de sostenibilidad y responsabilidad en gestión pública.

Bibliografía

- ACI 222R-01. (2001). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. American Concrete Institute.
- ACI 222R-19. (2019). *Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ADIF. (2025). *Adif en cifras*.
- Administrador de Infraestructuras Ferroviarias. (2022). Cuadro de Precios de Conservacion y Mantenimiento de Infraestructuras. Documentacion Interna.
- Administrador de Infraestructuras Ferroviarias. (2025). *Base de Precios de ADIF*. Retrieved from ADIF: <https://bpa.adif.es/bp1/#/welcome>
- AEC. (2021). *aecarretera.com*. Retrieved from <https://www.aecarretera.com/quienes-somos/historia/historia-de-la-carretera>
- AGG POWER SOLUTIONS. (2026). *agppower*. Retrieved from A Series 16.5-150kVA.
- Andrade, C., & D' Andrea, R. (2010). Electrical Resistivity as Microstructural Parameter for the Modeling of Service Life of Reinforced Concrete Structures. *2nd International Symposium on Service Life Design for*, 379-388.
- Andrade, C., Ortin, G., Soldevila, J., & Orte, J. (2024). *Guia de proteccion frente a la corrosion del hormigon armado mediante el uso de inhibidores de corrosion y/o proteccion catodica*. Barcelona: Mapei Spain, S.A.U., Quimilock, S.A., Procainsa, S.A.
- Arenas, J., & Ortega, M. (2001). *Puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Balafas, I., & Burgoyne, C. (2011). Modeling the Structural Effects of Rust in Concrete Cover. *Journal of Engineering Mechanics*, 175-185.
- Barbu, C., Fierascu, I., Semenescu, A., & Cotrut, C. (2025). Critical Review Regarding the Application of Plant Extracts as Eco-Friendly Corrosion Inhibitors—A Sustainable Interdisciplinary Approach. *Molecules* 30, 3722.
- Bastidas-Arteaga, E., Sanchez - Silva, M., Chateauneuf, A., & Silva, M. (2008). Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures. *Structural Safety, Vol 30, Issue 2*, 110-129.
- Bermudez, M., & Alaejos, P. (2007). Permeabilidad a los cloruros del hormigon armado situado en ambiente marino sumergido. *Revista ingenieria de construccion*, 15-22.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Rob, P. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. Wiley.
- Broomfield, J. (2007). *Corrosion os Steel in Concrete*. Abingdon: Taylor & Francis.
- Canovas, M. (1967). Los cambios de temperatura en los revestimientos epoxi. *Informes de la construccion vol. 19 n. 189*, 87-97.
- CEDEX. (2018). *Guia para la inspeccion y mantenimiento de estructuras de hormigon*. CEDEX: Servicio de publicaciones.

- CENIM. (2021). *cenim.csic.es*. Retrieved from <https://www.cenim.csic.es/grupos-de-investigacion/corrosion-atmosferica-pinturas-anticorrosivas-capa/>
- Comision Permanente del Hormigon, & Comision Permanente de Estructuras de Acero. (2021). *Codigo Estructural*. Ministerio de Fomento.
- Comite tecnico AEN/CTN 150 Gestion Medioambiental. (2006). *UNE-EN ISO 14040*. Madrid: AENOR.
- Comite Tecnico AEN/CTN 83 Hormigon. (2004). *Productos y sistemas para la proteccion y reparacion de estructuras de hormigon*. Madrid: AENOR.
- Comite Tecnico AEN/CTN 83 Hormigon. (2006). *UNE-EN 1504-3 Productos y sistemas para la proteccion y reparacion de estructuras de hormigon*. Madrid: AENOR.
- Comite Tecnico CTN 198. (2020). *UNE-EN 15804:2012+A2 - Sostenibilidad en la construccion*. Madrid: Asociacion Española de Normalizacion.
- Comite Tecnico CTN 216. (2018). *UNE - EN ISO 14067 Gases de efecto invernadero, huella de carbono de productos, requisitos y directrices para cuantificacion*. Madrid: Asociacion Europea de Normalizacion.
- Comite Tecnico CTN-UNE 48 Pinturas y Barnices. (2008). *Norma Española: UNE-EN ISO 8501-1*. Madrid: Asociacion Española de Fabricantes de Pinturas y Tintas de Imprimir.
- Direccion General de Carreteras. (2012). *Guia para la realizacion de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado*. España: Centro de Publicaciones Secretaria General Tecnica.
- Drizoro. (2024). *Drizoro*. Retrieved from Maxrite-inhibitor: <https://www.drizoro.com/producto/maxrite-inhibitor/>
- Drizoro. (2024). *Drizoro Construction Products*. Retrieved from Maxrite-Inhibitor: <https://www.drizoro.com/producto/maxrite-inhibitor/>
- Drizoro. (2024). *Drizoro Construction Products*. Retrieved from Maxrite-passive: <https://www.drizoro.com/producto/maxrite-passive/>
- Drizoro. (2025). *Drizoro Construction Products*. Retrieved from Maxsheen-elastic: <https://www.drizoro.com/producto/maxsheen-elastic/>
- Ecoinvent*. (2024, Feb 02). Retrieved from ecoinvent: <https://ecoinvent.org/database/>
- Emerson, F., Lombardi, T., Lavinicki, B., & de Castro, T. (2024). Integrating machine learning and Monte Carlo Simulation for probabilistic assessment of durability in RC structures affected by carbonation-induced corrosion. *Building Pathology and Rehabilitation*.
- Energy Information Administration. (2024, Septiembre 18). *EIA*. Retrieved from Environment: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php?
- EPD EN 15804. (2020). *ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION for Natural Inert Materials "Sand and gravel"*. Piecenza: EPD Italy.
- EPD International AB. (2019). *Environmental Product Declaration for: Morteros para pasivacion de armaduras y proteccion anticorrosion, productos para pasivacion y proteccion del acero*. Suecia: The International EPD System.

- EPD International AB. (2019). *Environmental Product Declaration for: Resinas en base acrilica, epoxi y poliuretano para impermeabilizacion y proteccion*. Suecia: The International EPD System.
- EPD International AB. (2022). *Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE*. Sweden: The International EPD System.
- European Environment Agency. (2019). *European Comission Joint Research Center*. Retrieved from Computer model to calculate emissions from road traffic:
<https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-copert/#model-summary>
- Fahim , G., Mirza, J., Ismail, M., & Ghoshal, S. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, 54-74.
- Feliu, S., & Andrade, C. (1989). *Manual: Inspeccion de obras dañadas por corrosion*. Madrid: Acor, Artes Graficas, S.A.
- Fernandez, A. (2023). *Informe final de Obra para los servicios de mantenimiento y obras de mejora de puentes de hormigon y fabrica de la red administrada por ADIF*. Madrid: IMESAPI, documentacion interna.
- Fernandez, G., Verdeja, J., & Perosanz, J. (2011). Corrosion por picadoras de una tuberia de acero al carbono. *Revista de Minas* 43, 43-49.
- fib commission 4. (2014). *Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Switzerland: International Federation for Structural Concrete.
- Fundacion Laboral de la Construcccion. (2024, 05 15). *Fundacion Laboral de la Construcccion Castilla-La Mancha*. Retrieved from Revestimientos impermeabilizantes. Tipos y caracteristicas.:
<https://castillalamancha.fundacionlaboral.org/actualidad/noticias/territorial/revestimientos-impermeabilizantes-tipos-y-caracteristicas>
- GCP Applied Technologies Inc. (2022, 10 27). *Environmental Product Declaration: Corrosion Inhibitor*. Massachusetts: ASTM International.
- Genesca, J. (1989). *Mas Alla de la Herrumbre: la lucha contra la corrosion*. Mexico: Fondo de Cultura Economica.
- Gokasar, I., Deveci, M., & Kalan, O. (2022). CO 2 Emission based prioritization of bridge maintenance projects using neutrosophic fuzzy sets based decision making approach. *Research in Transportation Economics. Vol 91*, Volume 91.
- Gonzalez, L. A. (2014). *Comportamiento frente a la durabilidad de morteros de reparacion de cemento modificados con polimeros*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Gonzalez, M., Garcia, R., & Fernandez, J. (2020). Environmental assessment of scaffolding in building construction. *Journal of Cleaner Production*, Vol.253 paginas 1-10.
- Grupo Puma. (2024). *Guia de Sistemas de Impermeabilizacion Cementosos y Polimericos*. Madrid: Grupo Puma.

- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Embodied Carbon: The inventory of carbon and energi (ICE)*. Bath: BSRIA.
- HAMPSHIRE GENERATORS. (2025). *HAMPSHIRE GENERATORS*. Retrieved from AGG AS44D5 40kVA Diesel Generator: <https://www.hampshiregenerators.co.uk/wp-content/uploads/2023/11/AGG-AS44D5-40-kVA-Diesel-Generator-Datasheet.pdf>
- INE. (2025). *¿Cuanto ha variado el IPC desde...?* Retrieved from Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do?idmesini=1&anyoini=2024&idmesfin=1&anyofin=2025&ntipo=1&enviar=Calcular>
- InfoConstruccion. (2024, Mayo 08). *infoconstruccion*. Retrieved from infoconstruccion.es: <https://www.infoconstruccion.es/noticias/20240508/menores-residuos-construccion-industralizada?>
- INFRAS. (2022). *HBEFA*. Retrieved from HBEFA: <https://www.hbefa.net/>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japon: Institute for Global Environmental Strategies .
- Jimenez, B. (2019). *Gestion de la corrosion; Proteccion catodica*. Alcobendas: SIKA, S.A.U.
- Jones, D. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*. Nevada: Prentice Hall.
- Kodur, V., Bhatt, P., & Naser, M. (2019). High temperature properties of fiber reinforced polymers and fire isulation for fire resistance modeling of strengthened concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, Volume 175.
- Kong, J., Ababneh, A., Frangopol, D., & Xi, Y. (2002). Reliability analysys of chloride penetration un saturated concrete. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 305-315.
- Li, C. (2004). Initiation of Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Concrete Structural Members-Experimentation. *Structural Journal*, 502-518.
- Liang, M.-T., Huang, R., & Fang, S.-A. (2013). Carbonation Service Life Prediction of Existing Concrete Viaduct/ Bridge Using Time-dependent Reliability Analysis. *Journal of Marine Science and Technology*, 94-104.
- Liang, M.-T., Huang, R., & Yeh, C.-J. (2009). Service Life Prediction of Pier for the Existing Reinforced Concrete Bridges in Chloride-Laden Enviroment. *Journal of Marine Science and Technology*, 312-319.
- Liu, Y., & Weyers, R. (1998). Modeling the Time-to-Corrosion Cracking if the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. *ACI Materials Journal*, 611-613.
- Lopez, J. (2012). *Refuerzo a flexion de vigas de hormigon mediante polimeros reforzados con fibra de carbono*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Lu, Z.-H., Lun, P.-Y., Li, W., Luo, Z., Li, Y., & Liu, P. (2019). Empirical Model of Corrosion Rate for Steel Reinforced Concrete Structures in Chloride-laden Environments. *Advances in Structural Engineering 22(1)*, 223-239.
- Ma, M., Liu, M., & Li, Z. (2023). Quantifying the Environmental Impact of Vehicle Emissions. *Sustainability*, 15,7825.

- MAPEI. (2025). *MAPEI*. Retrieved from Lista de productos: https://www.mapei.com/es/es/productos-y-soluciones/lista-de-productos/detalles-del-producto/planitop-rasa---ripa?gad_source=1&gad_campaignid=22991459265&gbraid=0AAAAADDYStOM-9Zt-uukHxq4goN9TaRsL&gclid=CjwKCAiAjojLBhAlEiwAcjhrDIFvYFUmcDCeFF3rpKxjgeNH7M2W
- Martins, C. (2019). *Impacto ambiental de diferentes tipologías de viviendas*. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Mays, G. (1992). *Durability of Concrete Structures*. Reino Unido: E & FN SPON.
- Milic, I., & Bleiziffer, J. (2024). Life cycle assessment of the sustainability of bridges: methodology, literature review and knowledge gaps. *Sec. Bridge Engineering*, Volume 10.
- Ministerio de Fomento. (2010). *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. 4ta Edición*. España: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica.
- Ministerio de la Presidencia. (2008). *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*.
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2022, 01 18). *ADIF*. Retrieved from ADIF: <https://www.adif.es/-/adif-licita-la-mejora-y-el-mantenimiento-de-los-puentes-de-hormig%C3%B3n-y-f%C3%A1brica-de-la-red-ferroviaria>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024). *Código Estructural*. España: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica.
- MITECO. (2013, Diciembre 09). *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. Retrieved from Guías y directrices para la evaluación ambiental: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/guias-directrices.html>
- Morinaga, S. (1988). Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on rate of corrosion of reinforcing steel. *Special Report of Institute of Technology*, Vol. 23.
- Mosquera, M. J. (2013). Nuevos productos para restauración y conservación del Patrimonio Cultural. *RIIPAC nº2*, 153-172.
- Neville, A. (2010). *Concrete Technology 2nd Edition*. Londres: Prentice Hall.
- Neville, A. (2011). *Properties of concrete*. Londres: Pearson Education Limited.
- Nwigwe, U., & Nwoye, C. (2023). Green corrosion inhibitors for steel and other metals in basic media: A mini-review. *Research on Engineering Structures & Materials*, 9(3): 775-789.
- Pan, T., & Wang, L. (2011). Finite-Element Analysis of Chemical Transport and Reinforcement Corrosion-Induced Cracking in Variably Saturated Heterogeneous Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Volume 137, Issue 5, 334-345.
- Pauliuk, S., Milford, R., Muller, D., & Allwood, J. (2013 47 (7)). The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*, 3448-3454.
- Peiren, S. C. (2007). Rehabilitación estructural de un sector afectado por corrosión severa en vigas de entrepiso en una cuartel. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 236-244.

- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment e What does the evidence say? *Journal of Environmental Management* 181, 687-700.
- PROPAMSA. (2021, 04 22). Declaracion Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparacion. España: AENOR.
- PROPAMSA. (2021, 04 22). Declaracion Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros de reparacion. Barcelona: AENOR.
- Purnell, P. (2013). *The carbon footprint of reinforced concrete*. Leeds: Advances in Cement Research.
- Quimilock. (2019). *Inhibidores de Corrosion Migratorios MCI para Hormigon Armado*. Madrid, Getafe: Quimilock SAU.
- Ranjith, A., Balaji Raio, K., & Manjunath, K. (2016). Evaluating the effect of corrosion on service life prediction of RC structures - A parametric study. *International Journal of Sustainable Built Enviroment*, 587-603.
- Rodriguez , J., & Andrade, C. (2001). *CONTECVET: A validated Users Manual for assesing the residual service life of concrete structures*. España: Instituto de Ciencias de la Construccion Eduardo Torroja.
- Rodriguez Escribano, R. R. (2024). Corrosion de armaduras en estructuras de hormigon armado y pretensado. Madrid, Madrid, España.
- Rodriguez, J., Anaya, P., Andrade, C., & Martin, B. (2020). Determinacion de la longitud de transferencia de alambres con distintos grados de corrosion en elementos pretensados de hormigon. *Informes de la Construccion*, 72(558).
- Rodriguez, J., Ortega, L., & Casal, J. (1997). Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 239-248.
- Sbahieh, S., Mckay, G., & Al-Ghamdi, S. (2023). A comparative life cycle assessment of fiber-reinforced polymers as a sustainable reinforcement option in concrete beams. *Frontiers in Built Environment* 9:1194121.
- SIKA. (2025). *Sika*. Retrieved from Sika: <https://arg.sika.com/es/construccion/refuerzo-de-estructuras/refuerzo-de-estructuras.html>
- Silva, M. (2011). *Tecnica e ingenieria de España VI*. Zaragoza: Real Academia de Ingenieria.
- Song, H.-W., Kim, H.-J., Saraswathy, V., & Kim, T.-H. (2007). A Micro-mechanics Based Corrosion Model for Predicting the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Electromechanical Science, Vol 2, Issue 4*, 314-354.
- Stewart, M., & Rosowsky, D. (1998). Structural Safety and Serviceability of Concrete Bridges Subject to Corrosion. *Journal of Infrastructure Systems Volume 4, Issue 4*, 146-155.
- Technical Committee ISO/TC 207. (2006). *ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures*. Ginebra: ISO.
- Teng, J., Chen, J., Smith, T., & Lam , L. (2002). *FRP-strengthened RC structures*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons.

- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Estocolmo: CBI forskning research.
- UIC. (2016). *Guidelines for the maintenance of railway structures*. Paris: International Energy Agency.
- UN environment programme. (2020). *2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vazquez Fernandez, K. (2020). Propuesta de una Metodología para la Determinación de la Velocidad de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado y de la Consiguiente Pérdida de Capacidad Resistente en el Tiempo. Madrid, Madrid, España: Universidad Europea de Madrid.
- Vu, K., & Stewart, M. (2005). Predicting the Likelihood and Extent of Reinforced Concrete Corrosion-Induced Cracking. *Journal of Structural Engineering, Volume 131, Issue 11*, 1681 - 1689.
- Xing, Z., Li, Z., Wang, P., Li, C., & Song, Z. (2025). Research on the Mechanical Properties and Microstructure of. *Coatings 2025, 15, 1239*.
- Zhang, D., Zeng, Y., & Fang, M. (2019). Service life prediction of precast concrete structures exposed to chloride environment. *Advances in Civil Engineering*, 20-24.
- Zhang, K., Wang, L., & Tam, V. (2021). Environmental impacts of construction and repair materials: A meta-analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 167.

**ANEXO I: CÁLCULO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE
LAS UNIDADES DE OBRA ASOCIADAS CON LA
REPARACIÓN DERIVADA DEL PROCESO DE LA
CORROSIÓN**

ANEXO I. CÁLCULO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS UNIDADES DE OBRA ASOCIADAS CON LA REPERACIÓN DERIVADA DEL PROCESO DE LA CORROSIÓN

1. Objetivo del Anexo

Este anexo presenta el cálculo detallado del impacto ambiental, medido mediante el Potencial de Calentamiento Global (PCG) y expresado en $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$, de las seis unidades de obra restantes consideradas en este trabajo, además del ejemplo desarrollado en el apartado 3.5.5 para la reconstrucción de secciones con mortero R4.

El objetivo es disponer de valores unitarios homogéneos y trazables para cada unidad de obra, calculados bajo un enfoque simplificado y comparativo, de acuerdo con las premisas metodológicas establecidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4

2. Unidades de obra a calcular

En los subapartados siguientes se desarrolla, un esquema similar al aplicado en 3.5.5, el cálculo unitario ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$) para las siguientes unidades de obra:

- Picado mecánico de superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte
- Chorro de superficie mediante proyección de árido
- Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras
- Aplicación de inhibidor de corrosión
- Aplicación de pintura anticarbonatacion
- Laminado de fibra de carbono

2.1 Picado mecánico de superficie de hormigón y posterior limpieza del soporte (m^2)

2.1.1 Definición de la unidad de obra

Como se indica en el apartado 3.4.3 del presente trabajo, esta actuación no se encuentra definida como una partida independiente en la BPA, y su valoración se ha realizado a partir del descompuesto incluido en el anejo de justificación de precios de un proyecto constructivo de ADIF relativo a la reparación de estructuras de hormigón. Dicho descompuesto recoge de forma detallada los recursos necesarios para la ejecución de la unidad, incluyendo mano de obra, maquinaria y medios auxiliares que es la siguiente:

Descripción	Cantidad	Unidad
Peon	0.715	h
Peon especialista	0.715	h
Grupo electrógeno 40kva	0.390	h
Equipo de picado	0.715	h

De acuerdo con las premisas metodológicas definidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4 se excluyen del cálculo del impacto ambiental la mano de obra y se considera únicamente las categorías correspondientes a materiales y maquinaria y equipos.

2.1.2 Criterio de valoración adoptado

Como se puede observar, esta unidad no tiene ningún material asociado. Únicamente se debe valorar el impacto de la maquinaria y equipos para las cuales se adopta el siguiente criterio:

- El grupo electrógeno es el equipo que consume combustible y por tanto permite un cálculo directo mediante la relación de litros/hora a kg CO₂ eq/hora.
- El equipo de picado es un equipo eléctrico que está siendo alimentado por el grupo. Por lo tanto, su impacto por fabricación/amortización no se incluye por quedar fuera de un enfoque dentro de los módulos A1-A3. Y por otro lado, su consumo energético ya está incluido en el consumo del grupo electrógeno al tratarse de un equipo eléctrico alimentado por el grupo electrógeno, por lo que su contribución ambiental ya queda recogida dentro del consumo de gasoil del grupo (L/h).

En consecuencia, el cálculo ambiental de esta unidad se basa únicamente en el consumo de combustible del grupo electrógeno asociado a las 0.39 h por m² de superficie tratada.

2.1.3 Datos y factores de emisión

- Consumo de combustible del grupo electrógeno (L/h)
Se adopta como valor de referencia de un grupo diésel de 40kVA al 50% de carga, este es un valor bastante conservador y se considera representativo de operación en obra con cargas parciales y variable durante la operación del picado.
En base a la ficha técnica de un generador de 40kVA convencional se reporta que a un 50% de carga este tiene un consumo aproximado de combustible de 3.65 L/h. (HAMPSHIRE GENERATORS, 2025)
- Factor de emisión del diésel (kg CO₂/L)
Se emplea un coeficiente de emisiones de CO₂ por volumen de diésel a partir de una fuente oficial. La EIA publica que este factor es de 22.45 lb CO₂ o lo que es lo mismo 2.69 kg CO₂/L (Energy Information Administration, 2024). Este valor se expresa de esta forma sumiendo que el CO₂ domina el resultado de la combustión, coherente con el enfoque de este trabajo.

2.1.4 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²)

Horas de grupo por m² en base al descompuesto:

$$t_{grupo} = 0.39 \frac{h}{m^2}$$

Consumo de diésel por m² con el escenario considerado del 50% de carga:

$$q_{diesel} = t_{grupo} * C_{50\%} = 0.39 * 3.65 = 1.42 \frac{L}{m^2}$$

Impacto unitario:

$$PCG_{Total} = q_{diesel} * FE_{diesel} = 1.42 * 2.69 = 3.82 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

2.2 Chorro de superficie mediante proyección de árido (m²)

2.2.1 Definición de la unidad de obra

Esta unidad si viene definida en la BPA como “Chorroado de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.” Y se mide por unidad de superficie en m².

Esta unidad tiene el siguiente descompuesto:

Descripción	Cantidad	Unidad
Capataz	0.022	h
Peon especialista	0.220	h
Peon	0.220	h
Equipo de chorro de arena	0.220	h
Grupo electrógeno 30kva	0.220	h
Árido de cuarzo	1.500	kg

De acuerdo con las premisas metodológicas definidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4 se excluyen del cálculo del impacto ambiental la mano de obra y se considera únicamente las categorías correspondientes a materiales y maquinaria y equipos.

2.2.2 Criterio de valoración adoptado

El proceso de chorreo tiene un aporte energético asociado, en la práctica, a un sistema compresor-chorreadora-accesorios. Sin embargo, en el descompuesto de la unidad de obra descrito en la BPA, dicho aporte energético queda representado de manera explícita mediante el uso de un grupo electrógeno de 30kVA. En consecuencia, y con el fin de mantener un proceso trazable y homogéneo, el impacto asociado al consumo energético del proceso se imputa al consumo de combustible por parte de este equipo.

El equipo de chorro de arena se interpreta como equipo de trabajo sin combustible propio cuantificado o bien alimentado energéticamente por el grupo incluido en la propia unidad. Por lo tanto, para este equipo no se asigna un consumo adicional de combustible, evitando así un doble conteo de la energía.

2.2.3 Datos y factores de emisión

- Grupo electrógeno 30kVA (diésel)
Se adopta como el valor representativo y los parámetros son similares a los del grupo usado en el apartado 2.1.3. Donde se establece que el consumo de un grupo asociado a esta unidad está al 50% de carga. Y de la misma forma se considera un valor de referencia de 3.65 L/h según el fabricante (AGG POWER SOLUTIONS, 2026).
Y por otro lado se emplea un coeficiente de emisiones de CO₂ por volumen de diésel a partir de una fuente oficial. La EIA publica que este factor es de 22.45 lb CO₂ o lo que es lo mismo 2.69 kg CO₂/L (Energy Information Administration, 2024). Este valor se expresa de esta forma sumiendo que el CO₂ domina el resultado de la combustión, coherente con el enfoque de este trabajo.
- Árido de cuarzo (abrasivo)
El impacto del abrasivo se modeliza mediante un factor A1-A3 representativo de áridos utilizados habitualmente como abrasivos. Se adopta una DAP para áridos donde para “Dry sand in Bulk” donde se tiene lo siguiente:

ENVIRONMENTAL IMPACTS	UNIT	Case 2.1 – Dry sand in bulk			
		UPSTREAM	CORE		TOTAL
		A1	A2	A3	
GWP	[kg CO ₂ -Eq.]	1,85E+01	3,83E+00	2,47E-02	2,24E+01
ODP	[kg CFC ₁₁ -Eq.]	2,31E-06	6,95E-07	2,93E-09	3,01E-06
AP	[kg SO ₂ -Eq.]	3,81E-02	2,91E-02	9,44E-05	6,72E-02
POCP	[kg C ₂ H ₄ -Eq.]	1,61E-03	7,64E-04	1,63E-05	2,39E-03
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Eq.]	8,87E-03	6,76E-03	4,37E-05	1,57E-02
ADPE	[kg Sb-Eq.]	2,74E-06	1,29E-06	7,94E-08	4,11E-06
ADPF	[MJ]	2,84E+02	5,55E+01	3,20E-01	3,40E+02

Figura 51 Tabla de resultados para el caso 2.1 Dry Sand in Bulk (EPD EN 15804, 2020)

Donde se declara un GWP de 22,4 kg CO₂ eq/ton, equivalente a 0.0224 kg CO₂ eq/kg.

2.2.4 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²)

- Contribución de maquinaria y equipos:

Horas de grupo por m² en base al descompuesto:

$$t_{grupo} = 0.22 \frac{h}{m^2}$$

Consumo de diésel por m² con el escenario considerado del 50% de carga:

$$q_{diesel} = t_{grupo} * C_{50\%} = 0.22 * 3.65 = 0.803 \frac{L}{m^2}$$

Impacto unitario:

$$PCG_{grupo} = q_{diesel} * FE_{diesel} = 0.803 * 2.69 = 2.16 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

- Contribución de materiales (árido de cuarzo):

Para un consumo de 1.5 kg/m² se tiene:

$$PCG_{arido} = 1.5 * 0.0224 = 0.0336 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

- Resultado total:

$$PCG_{Total} = PCG_{grupo} + PCG_{arido} = 2.16 + 0.0336 = 2.19 \frac{kg CO_2eq}{m^2}$$

2.3 Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras (m²)

2.3.1 Definición de la unidad de obra

Esta unidad viene definida en la BPA como “Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.” Y se mide por unidad de superficie en m2.

Esta unidad tiene el siguiente descompuesto:

Descripción	Cantidad	Unidad
Capataz	0.030	h
Oficial 1A	0.300	h
Pasivador	0.700	kg

De acuerdo con las premisas metodológicas definidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4 se excluyen del cálculo del impacto ambiental la mano de obra y se considera únicamente las categorías correspondientes a materiales y maquinaria y equipos.

2.3.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP

Para garantizar consistencia entre el producto evaluado y el dato ambiental, se adopta como referencia el producto Maxrite Passive (pasivante a base de cemento) del fabricante español Drizoro y su correspondiente DAP verificada.

Dado que la BPA define el pasivador como “tipo...o similar” (sin identificar el fabricante ni formulación exacta), no es metodológicamente exacto emplear el consumo definido en la BPA como consumo del producto al que pertenece la DAP. En consecuencia y con el mismo criterio aplicado en el ejemplo del apartado 3.5.5, el consumo se toma de la ficha técnica del producto asegurando comparabilidad producto-impacto.

2.3.3 Consumo de producto

La ficha técnica de Maxrite Passive establece, para protección de armaduras, la aplicación en dos capas, con un consumo total de 2.6kg/m² para un espesor final recomendado de 2mm (Drizoro, Drizoro Construction Products, 2024).

Dicho valor se adopta como consumo unitario representativo de la actuación.

2.3.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible

La DAP tiene como unidad declarada 1m² de superficie cubierta con el producto, con una masa asociada de 0.69kg (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Morteros para pasivacion de armaduras y proteccion anticorrosion, productos para pasivacion y proteccion del acero, 2019).

Aunque la BPA pueda proporcionar en la unidad consumos ligeramente distintos (0.70 kg en el descompuesto), a efectos de este trabajo para mantener una coherencia entre consumo y factor de emisión. Se adopta el consumo del fabricante asociado al producto cuya DAP se emplea.

En base a esto, la DAP establece lo siguiente:

Resultados de impacto ambiental por unidad declarada (1 m ²) para la familia de Morteros para pasivación de armaduras y protección anticorrosión, Productos para pasivación y protección del acero										
Indicador	Unidad	A1	A2	A3	A1-A3	C1	C2	C3	C4	Módulo D
GWP-fossil	kg CO ₂ eq.	5,12E-01	1,64E-02	1,50E-01	6,79E-01	0	4,79E-03	0	3,66E-03	0
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq.	7,84E-04	8,72E-07	4,77E-04	1,26E-03	0	2,57E-07	0	2,23E-05	0
GWP-luluc	kg CO ₂ eq.	2,61E-04	1,23E-07	5,08E-04	7,69E-04	0	3,63E-08	0	1,31E-06	0
GWP-Total	kg CO ₂ eq.	5,13E-01	1,64E-02	1,51E-01	6,81E-01	0	4,79E-03	0	3,69E-03	0
ODP	kg CFC 11 eq.	3,49E-08	3,77E-09	1,60E-08	5,47E-08	0	1,11E-09	0	6,52E-10	0
AP	mol H+ eq.	2,17E-03	5,49E-05	7,39E-04	2,96E-03	0	1,65E-05	0	3,41E-05	0
EP-freshwater	kg P eq.	1,28E-05	8,86E-09	7,34E-06	2,01E-05	0	2,61E-09	0	4,59E-08	0
EP-marine	kg N eq.	1,13E-03	1,74E-05	1,83E-04	1,33E-03	0	5,32E-06	0	1,41E-05	0
EP-terrestrial	mol N eq.	4,63E-03	1,91E-04	2,04E-03	6,86E-03	0	5,85E-05	0	1,55E-04	0
POCP	kg NMVOC eq.	1,46E-03	5,23E-05	7,78E-04	2,29E-03	0	1,60E-05	0	4,27E-05	0
ADP-minerals and metals ¹	kg Sb eq.	9,54E-08	6,89E-10	4,05E-08	1,37E-07	0	2,03E-10	0	1,53E-10	0
ADP-fossil ¹	MJ	9,42E+00	2,30E-01	3,52E+00	1,32E+01	0	6,78E-02	0	4,87E-02	0
WDP ¹	m ³	2,78E-01	-4,88E-05	9,36E-02	3,71E-01	0	-1,44E-05	0	1,18E-04	0
Acrónimos	GWP-fossil = Calentamiento global potencial combustibles fósiles; GWP-biogenic = Calentamiento global potencial biogénico; GWP-luluc = Calentamiento global potencial uso del suelo; ODP = Agotamiento potencial de la capa de ozono estratosférico; AP = Acidificación potencial; EP-freshwater = Eutrofización potencial, agua dulce; EP-marine = Eutrofización potencial, agua marina; EP-terrestrial = Eutrofización potencial terrestre; POCP = Formación potencial de ozono troposférico; ADP-minerals&metals = Agotamiento potencial de recursos minerales; ADP-fossil = Agotamiento potencial de recursos fósiles; WDP = Uso de agua									
¹ Los resultados de este indicador de impacto ambiental deben utilizarse con prudencia, ya que las incertidumbres de los resultados son elevadas y la experiencia con este parámetro es limitada.										

Tabla 14 Resultados de impacto ambiental por unidad declarada (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Morteros para pasivacion de armaduras y proteccion anticorrosion, productos para pasivacion y proteccion del acero, 2019)

Para dicha unidad declarada, el indicador GWP total en los módulos A1-A3 es de 0.681 kg CO₂eq y para aplicar el dato a un consumo expresado en kg/m² se realiza un ajuste proporcional a la masa:

$$PCG_{imprimacion} = 0.681 \frac{q}{0.69}$$

Donde q es el consumo real adoptado para un metro cuadrado.

2.3.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²)

Sustituyendo q=2.6 kg/m² se tiene lo siguiente:

$$PCG_{Total} = 0.681 \frac{2.6}{0.69} = 2.57 \frac{kg\ CO_2eq}{m^2}$$

Este es el valor que se incorpora a la tabla de impactos unitarios del anexo para su posterior utilización en los paquetes de intervención y estadios de degradación.

2.4 Aplicación de inhibidor de corrosión (m²)

2.4.1 Definición de la unidad de obra

Esta unidad viene definida en la BPA como “Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasiva la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm², no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m², previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.” Y se mide por unidad de superficie en m².

Esta unidad tiene el siguiente descompuesto:

Descripción	Cantidad	Unidad
Capataz	0.030	h
Oficial 1A	0.300	h
Inhibidor de corrosión	64.220	l

De acuerdo con las premisas metodológicas definidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4 se excluyen del cálculo del impacto ambiental la mano de obra y se considera únicamente las categorías correspondientes a materiales y maquinaria y equipos.

2.4.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP

La BPA define el inhibidor de forma genérica, sin identificar un producto o formulación concreta. Para evitar incoherencias al momento de asociar un consumo de la BPA a un producto con uno diferente. Se decide adoptar el mismo criterio que en las unidades previas donde ocurrió esto, se utiliza el consumo del producto específico que cuenta con la DAP, garantizando de esta manera coherencia y trazabilidad.

En consecuencia, se selecciona como producto de referencia el Maxrite Inhibitor del fabricante español Drizoro y se emplea su DAP verificada, que cubre de manera explícita esta referencia.

2.4.3 Consumo de producto

La ficha técnica del producto mencionado establece un consumo medio aproximado de entre 0.3-0.5 kg/m² (Drizoro, Drizoro Construction Products, 2024). Para disponer de un valor unitario representativo único se adopta un valor intermedio de 0.4 kg/m².

2.4.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible

La DAP tiene como unidad declarada 1m² de superficie cubierta con el producto, con una masa asociada de 0.69kg (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Morteros para pasivacion de armaduras y proteccion anticorrosion, productos para pasivacion y proteccion del acero, 2019).

Como información adicional, la DAP aporta los resultados de A1-A3 desagregados por referencia, indicando para el Maxrite Inhibitor un valor absoluto de 0.632 kg CO₂eq.

Para poder aplicar este resultado a un consumo expresado en kg/m², se transforma el dato a un factor de equivalencia por kg:

$$FE_{inhibido} = \frac{0.632}{0.69} = 0.916 \frac{kg CO_2eq}{kg}$$

2.4.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²)

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y considerando únicamente el inhibidor como material de esta unidad de obra se tendría:

$$PCG_{Total} = Consumo * FE_{inhibidor} = 0.4 * 0.916 = 0.37 \frac{kg CO_2eq}{m^2}$$

2.5 Aplicación de pintura anticarbonatacion

2.5.1 Definición de la unidad de obra

Esta unidad viene definida en la BPA como “Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m² en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.” Y se mide por unidad de superficie en m².

Esta unidad tiene el siguiente descompuesto:

Descripción	Cantidad	Unidad
Capataz	0.018	h
Oficial 1A	0.180	h
Ayudante	0.120	h
Peon especialista	0.050	h
Pintura anticarbonatacion	0.600	kg

De acuerdo con las premisas metodológicas definidas en los apartados 3.5.1 a 3.5.4 se excluyen del cálculo del impacto ambiental la mano de obra y se considera únicamente las categorías correspondientes a materiales y maquinaria y equipos.

2.5.2 Criterio de coherencia producto-consumo-DAP

Para garantizar la trazabilidad del cálculo ambiental, se emplea la ficha DAP correspondiente a la familia de resinas en base acrílica, epoxi y poliuretano para impermeabilización y protección de superficies del fabricante español Drizoro, que incluye de manera explícita el Maxsheen Elastic, una pintura anticarbonatacion en base a resinas acrílicas de dispersión acuosa.

Dado que el resultado del GWP procede de una DAP específica asociada a un producto concreto y siguiendo el mismo criterio aplicado en unidades anteriores, el consumo adoptado debe proceder de la ficha técnica del producto seleccionado, evitando aplicar el impacto de un producto específico a un consumo generalizado de la BPA.

2.5.3 Consumo de producto

Según la ficha técnica del producto a analizar la aplicación se realiza a dos capas con un consumo total aproximado de entre 0.6-0.8 kg/m² (Drizoro, Drizoro Construction Products, 2025). Para disponer de un valor unitario representativo y único se adopta un valor medio del intervalo de cálculo igual a 0.7 kg/m².

2.5.4 Factor de emisión (DAP) y conversión a unidad compatible

La DAP tiene como unidad declarada 1m² de superficie cubierta con el producto, con una masa asociada de 0.45kg (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Resinas en base acrílica, epoxi y poliuretano para impermeabilización y protección, 2019).

Como información adicional, la DAP aporta los resultados de A1-A3 desagregados por referencia, indicando para el Maxsheen Elastic un valor absoluto de 0.809 kg CO₂eq.

Para poder aplicar este resultado a un consumo expresado en kg/m², se transforma el dato a un factor de equivalencia por kg:

$$FE_{anticarb.} = \frac{0.809}{0.45} = 1.798 \frac{kg CO_2eq}{kg}$$

2.5.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²)

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y considerando únicamente la pintura anticarbonatación como material de esta unidad de obra se tendría:

$$PCG_{Total} = Consumo * FE_{anticarb.} = 0.7 * 1.798 = 1.26 \frac{kg CO_2eq}{m^2}$$

2.6 Laminado de fibra de carbono

En coherencia con la metodología del apartado 3.5 el impacto ambiental del refuerzo CFRP se calcula a partir de DAP verificadas y se expresa en kg CO₂ eq para el módulo A1-A3. Se mantiene el mismo criterio aplicado al resto de unidades, solo se contabilizan materiales y maquinaria y equipos y se excluyen mano de obra y medios auxiliares.

En esta unidad, aunque el descompuesto de la BPA incluye horas de uso de herramientas eléctricas, no se aporta ningún consumo energético (kWh), ni existe un equipo auxiliar de suministro cuantificado, por lo que no es posible asignar un factor de emisión sin introducir hipótesis adicionales (potencia real, rendimiento, mix eléctrico). Por esta razón y por qué el cálculo se limita únicamente a los módulos A1-A3, se limita el mismo al cálculo de materiales utilizando DAP del sistema CFRP completo (fibra + resinas necesarias).

2.6.1 Solución empleada usando CFRP en vigas de hormigón armado en π

Respecto a la disposición del refuerzo mediante el uso de CFRP en una viga π de hormigón armado se propone la utilización de laminado de fibra de carbono unidireccional en la cara inferior del nervio de la viga para reforzar la armadura longitudinal + hoja de fibra de carbono unidireccional para reforzar los cercos que componen la armadura transversal. Por otro lado, en las dos caras laterales del nervio se propone únicamente el refuerzo mediante uso de hoja de fibra de carbono unidireccional. Esta solución se ilustra en la siguiente imagen:



Figura 52 Disposición de refuerzo CFRP tanto longitudinal como transversalmente (Fernandez A., 2023)

Por lo mismo, esta partida estará descompuesta en dos unidades que viene descritas en la BPA:

- Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm², módulo elástico >2000 N/mm² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.
- Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m², de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm², módulo elástico >2000 N/mm² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.

En cualquier caso, para profundizar sobre la disposición y consideraciones a tomar en cuenta en este sistema ver el punto “Laminado de fibra de carbono” del apartado 3.4.3

2.6.2 Partida 1: Laminado de fibra de carbono (cara inferior del nervio)

2.6.2.1 Definición y unidad funcional

Esta partida está compuesta por un refuerzo mediante laminado CFRP adherido con adhesivo epoxi estructural, medida como m² de superficie reforzada (cara inferior), tras convertir la medición del laminado de la BPA de ml a una superficie equivalente según el criterio establecido en el apartado 3.4.3.

2.6.2.2 Fuente ambiental

Se adopta la DAP “Drizoro Composite” del fabricante español Drizoro, que declara impactos para 1m² de sistema instalado (laminado + adhesivo epoxi necesario para su colocación). En dicha ficha se indica que para 1m² de superficie cubierta se utiliza el adhesivo Maxepox Carbofix = 4 kg/m² y un peso total del sistema de 6.38 kg/m² (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022).

2.6.2.3 Factor de emisión

De la DAP del sistema Drizoro Composite se puede ver lo siguiente:

Resultados de impacto ambiental por unidad declarada (1 m ²) para el producto DRIZORO COMPOSITE										
Indicador	Unidad	A1	A2	A3	A1-A3	C1	C2	C3	C4	Módulo D
GWP-fossil	kg CO ₂ eq.	2,27E+01	7,89E-01	5,62E+00	2,91E+01	0	4,40E-02	0	3,37E-02	0
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq.	7,46E-02	4,20E-05	7,13E-02	1,46E-01	0	2,36E-06	0	2,05E-04	0
GWP-luluc	kg CO ₂ eq.	6,40E-03	5,92E-06	2,61E-02	3,25E-02	0	3,34E-07	0	1,21E-05	0
GWP-Total	kg CO ₂ eq.	2,27E+01	7,89E-01	5,72E+00	2,93E+01	0	4,41E-02	0	3,39E-02	0
ODP	kg CFC 11 eq.	4,62E-05	1,81E-07	7,30E-07	4,71E-05	0	1,02E-08	0	6,00E-09	0
AP	mol H ⁺ eq.	9,78E-02	2,64E-03	3,22E-02	1,33E-01	0	1,52E-04	0	3,14E-04	0
EP-freshwater	kg P eq.	5,19E-04	4,26E-07	3,33E-04	8,53E-04	0	2,40E-08	0	4,22E-07	0
EP-marine	kg N eq.	1,60E-02	8,34E-04	9,19E-03	2,61E-02	0	4,89E-05	0	1,30E-04	0
EP-terrestrial	mol N eq.	1,59E-01	9,19E-03	9,55E-02	2,64E-01	0	5,39E-04	0	1,42E-03	0
POCP	kg NMVOC eq.	7,11E-02	2,51E-03	3,29E-02	1,07E-01	0	1,47E-04	0	3,93E-04	0
ADP-minerals and metals ¹	kg Sb eq.	1,12E-05	3,32E-08	4,56E-05	5,69E-05	0	1,87E-09	0	1,41E-09	0
ADP-fossil ¹	MJ	4,41E+02	1,11E+01	9,52E+01	5,47E+02	0	6,24E-01	0	4,48E-01	0
WDP ¹	m ³	1,28E+01	-2,35E-03	3,23E+00	1,60E+01	0	-1,32E-04	0	1,09E-03	0
Acronimos	<p>GWP-fossil = Calentamiento global potencial combustibles fósiles; GWP-biogenic = Calentamiento global potencial biogénico; GWP-luluc = Calentamiento global potencial uso del suelo; ODP = Agotamiento potencial de la capa de ozono estratosférico; AP = Acidificación potencial; EP-freshwater = Eutrofización potencial, agua dulce; EP-marine = Eutrofización potencial, agua marina; EP-terrestrial = Eutrofización potencial terrestre; POCP = Formación potencial de ozono troposférico; ADP-minerals&metals = Agotamiento potencial de recursos minerales; ADP-fossil = Agotamiento potencial de recursos fósiles; WDP = Uso de agua</p>									
<p>¹Los resultados de este indicador de impacto ambiental deben utilizarse con prudencia, ya que las incertidumbres de los resultados son elevadas y la experiencia con este parámetro es limitada.</p>										

Tabla 15 Resultados de impacto ambiental para el producto Drizoro Composite (EPD Internacional AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022)

En base a la tabla anterior se puede ver que el GWP total del sistema Drizoro Composite es de 29.3 kg CO₂ eq/m².

2.6.2.4 Conversión de ml a m² y merma

En base a los criterios establecidos en la valoración económica se utiliza la conversión ya definida:

- Laminado equivalente: 14.55 ml/m² (según apartado 3.4.3)
- Ancho de cálculo: Se adopta un ancho b = 105mm = 0.105m. Por ser el límite inferior del rango indicado en la partida, garantizando un criterio trazable y conservados en la conversión geométrica.

Superficie equivalente del sistema por m² de cara inferior:

$$A_{eq} = 14.55 \frac{m}{m^2} * 0.15 \frac{m^2}{m} = 1.53$$

Además, el descompuesto de la BPA incluye un factor de 1.10 en el laminado, que se interpreta como merma/solapes y se traslada al cálculo ambiental para mantener consistencia con mediciones reales.

2.6.2.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²) de la Partida 1

$$PCG_{Laminado inferior} = 29.3 \frac{kg CO_2 eq}{m^2} * 1.53 * 1.10 = 49.31 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

2.6.3 Partida 2: Hoja unidireccional 400 g/m² (cara inferior y caras laterales del nervio)

2.6.3.1 Definición y unidad funcional

En esta unidad se considera un refuerzo mediante hoja CFRP unidireccional adherida/impregnada con resina epoxi y una imprimación previa. Esta solución se aplica tanto en la cara inferior, por encima del laminado longitudinal previamente calculado, como en las caras laterales.

2.6.3.2 Fuente ambiental

Se adopta la DAP del sistema “Drizoro Wrap”, que incluye 1m² de tejido + resinas necesarias para su instalación (imprimación + resina adhesiva/impregnación). La DAP explicita que para 1m² se debe utilizar la combinación de Maxprimer C = 0.2 kg/m² y Maxepox CS = 0.8 kg/m². (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022)

2.6.3.3 Factor de emisión

De la DAP del sistema Drizoro Composite se puede ver lo siguiente:

Resultados de impacto ambiental por unidad declarada (1 m ²) para el producto DRIZORO WRAP										
Indicador	Unidad	A1	A2	A3	A1-A3	C1	C2	C3	C4	Módulo D
GWP-fossil	kg CO ₂ eq.	3,73E+00	3,01E-01	9,68E-01	5,00E+00	0	8,98E-03	0	6,87E-03	0
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq.	8,85E-03	1,60E-05	9,40E-03	1,83E-02	0	4,82E-07	0	4,18E-05	0
GWP-luluc	kg CO ₂ eq.	6,06E-04	2,26E-06	2,10E-03	2,71E-03	0	6,80E-08	0	2,46E-06	0
GWP-Total	kg CO ₂ eq.	3,74E+00	3,01E-01	9,80E-01	5,02E+00	0	8,98E-03	0	6,91E-03	0
ODP	kg CFC 11 eq.	2,45E-06	6,93E-08	8,08E-08	2,60E-06	0	2,08E-09	0	1,22E-09	0
AP	mol H ⁺ eq.	1,49E-02	1,01E-03	5,67E-03	2,16E-02	0	3,10E-05	0	6,40E-05	0
EP-freshwater	kg P eq.	5,49E-05	1,63E-07	4,72E-05	1,02E-04	0	4,89E-09	0	8,60E-08	0
EP-marine	kg N eq.	2,99E-03	3,18E-04	1,18E-03	4,49E-03	0	9,97E-06	0	2,64E-05	0
EP-terrestrial	mol N eq.	2,33E-02	3,51E-03	1,29E-02	3,97E-02	0	1,10E-04	0	2,90E-04	0
POCP	kg NMVOC eq.	1,14E-02	9,60E-04	4,10E-03	1,64E-02	0	2,99E-05	0	8,01E-05	0
ADP-minerals and metals ¹	kg Sb eq.	9,73E-07	1,27E-08	2,38E-05	2,48E-05	0	3,81E-10	0	2,86E-10	0
ADP-fossil ¹	MJ	8,76E+01	4,23E+00	1,33E+01	1,05E+02	0	1,27E-01	0	9,13E-02	0
WDP ¹	m ³	1,94E+00	-8,96E-04	4,34E-01	2,38E+00	0	-2,69E-05	0	2,22E-04	0
Acróminos	<p>GWP-fossil = Calentamiento global potenciales combustibles fósiles; GWP-biogenic = Calentamiento global potencial biogénico; GWP-luluc = Calentamiento global potencial uso del suelo; ODP = Agotamiento potencial de la capa de ozono estratosférico; AP = Acidificación potencial; EP-freshwater = Eutrofización potencial, agua dulce; EP-marine = Eutrofización potencial, agua marina; EP-terrestrial = Eutrofización potencial terrestre; POCP = Formación potencial de ozono troposférico; ADP-minerals&metals = Agotamiento potencial de recursos minerales; ADP-fossil = Agotamiento potencial de recursos fósiles; WDP = Uso de agua</p>									
<p>¹Los resultados de este indicador de impacto ambiental deben utilizarse con prudencia, ya que las incertidumbres de los resultados son elevadas y la experiencia con este parámetro es limitada.</p>										

Tabla 16 Resultados de impacto ambiental para el producto Drizoro Wrap (EPD International AB, Environmental Product Declaration for: Materiales compuestos de fibra de carbono para refuerzo estructural DRIZORO WRAP y DRIZORO COMPOSITE, 2022)

En base a la tabla anterior se puede ver que el GWP total del sistema Drizoro Composite es de 5.02 kg CO₂ eq/m².

2.6.3.4 Merma y solapes

Al igual que con el laminado longitudinal, el descompuesto de la BPA incluye un factor de 1.10 en el laminado, que se interpreta como merma/solapes y se traslada al cálculo ambiental para mantener consistencia con mediciones reales.

2.6.3.5 Cálculo del PCG unitario (kg CO₂ eq/m²) de la Partida 1

$$PCG_{Laminado inferior/laterales} = 5.02 \frac{kg CO_2 eq}{m^2} * 1.10 = 5.52 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

2.6.4 Ponderación final por caras del nervio

Dado que el nervio presenta tres caras donde se aplica CFRP, una inferior y dos laterales, y que el diseño del refuerzo es distinto en cada una, el impacto debe expresarse de manera diferenciada:

- Cara inferior

$$PCG_{Total} = 49.24 + 5.52 = 54.76 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

- Caras laterales

$$PCG_{Total} = 5.52 \frac{kg CO_2 eq}{m^2}$$

2.7 Tabla final con los PCG de todas las unidades consideradas

A continuación, se muestra una tabla resumen con las unidades y el PCG obtenido en cada una de ellas, considerando una unidad funcional de 1m² de superficie intervenida e incluyendo el ejemplo realizado en el apartado 3.5.5.

Nº	Actuación	Descripción	Unidad	Código (BPA ADIF)	PCG (kg CO ₂ eq/m ²)
1	Picado mecánico de superficie de hormigón	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	m ²	Descompuesto actualizado BPA	3.82
2	Chorro de armaduras	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA070\$	2.19
3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	m ²	Descompuesto actualizado BPA	2.57
4	Reconstrucción con mortero R4	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m ² por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm ² , y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA140\$	19.58
5	Inhibidor de corrosión	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasa la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm ² , no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m ² , previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA180\$	0.37

6	Pintura anticarbonatación	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m ² en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA190\$	1.26
7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: Laminado y Hoja de fibra	Laminado de fibra de carbono unidireccional, de ancho mayor de 105 mm y 1,4 mm de espesor, de módulo elástico medio 170 GPa y resistencia a tracción media 3100MPa, para refuerzo de vigas; incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión del laminado con resina epoxi con resistencia al arrancamiento >14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, i/ parte proporcional de pequeño material, totalmente ejecutado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo. Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA160\$ + OGA170\$	54.76
7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: Solo Hoja de fibra	Hoja de fibra de carbono unidireccional, de 400 gr/m ² , de módulo elástico medio 230GPa y resistencia a tracción media 4900 MPa, incluso lijado previo de la superficie con disco de diamante, redondeado de esquinas y aspirado del polvo, aplicación de imprimación epoxi, y adhesión de la hoja embebiéndola entre dos capas de resina epoxi con resistencia al arrancamiento > 14 N/mm ² , módulo elástico >2000 N/mm ² y Marcado CE según UNE EN 1504 Parte 4, y parte proporcional de pequeño material, totalmente terminado. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	m ²	OGA170\$	5.52

Con esta tabla se concluye el cálculo de PCG de las unidades de obra asociadas a las intervenciones típicas por corrosión, aplicando de forma homogénea el alcance A1-A3 y considerando exclusivamente las categorías de materiales y maquinaria/equipos.

Se observa que las unidades vinculadas a aplicación de productos (pasivador, inhibidor y pintura anticarbonatación) presentan valores del orden de entre 0.37-2.57 kg CO₂ eq/m², mientras que las operaciones de preparación de superficies como el picado y chorro con abrasivo se sitúan en torno a 2.19-3.83 kg CO₂ eq/m², dominadas por el aporte energético del equipo auxiliar.

Finalmente, la reparación de paramentos con mortero R4 y el refuerzo con CFRP constituyen el principal salto de impacto ambiental, con valores significativamente superiores debido a la contribución de los materiales compuestos y resinas del sistema. Implicando 19.58 kg CO₂ eq/m² para la reparación con mortero, 54.76 kg CO₂ eq/m² para el refuerzo con laminado en la cara inferior y 5.52 kg CO₂ eq/m² en las caras laterales.

Esta tabla se integra directamente en el apartado 3.5.6 y sirve como una herramienta más para el cometido de este trabajo.

**ANEXO II: FICHA INTEGRADA DE EVALUACIÓN
DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN**

Nombre estructura:
Fecha de inspección:

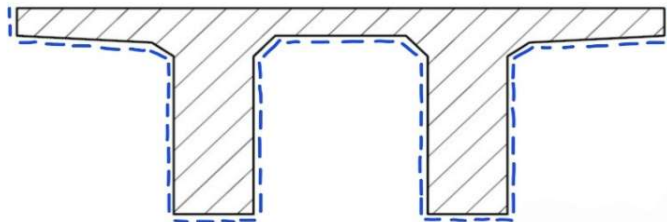
FICHA INTEGRADA DE EVALUACION DEL ESTADO DE DEGRADACION
DEFINICION DE ESTADIOS
Estadio F1 - Degradación Incipiente
Indicadores característicos Presencia de humedades y escurridos localizados Fisuras finas superficiales Desconchones/manchas puntuales sin armadura vista o con exposición localizada
Criterios relevantes *%Superficie afectada por corrosión $\leq 10\%$ **Pérdida de sección en armadura longitudinal $< 15\%$ *Para determinar la superficie afectada ver apartado XX **Medido previo cepillado de la armadura
Estadio F2 - Degradación Moderada
Indicadores característicos Desconchones frecuentes con presencia de armadura vista Fisuración más desarrollada incluso con filtraciones de agua Presencia de óxido activo y delaminaciones del recubrimiento
Criterios relevantes *%Superficie afectada por corrosión $> 10\%$ y $\leq 50\%$ **Pérdida de sección en armadura longitudinal $< 15\%$ *Para determinar la superficie afectada ver apartado XX **Medido previo cepillado de la armadura
Estadio F3 - Degradación Severa
Indicadores característicos Desconchones generalizados y pérdida extensa del recubrimiento Fisuras longitudinales asociadas a armaduras principales Corrosión activa con afección a armaduras longitudinales y transversales
Criterios relevantes *Pérdida de sección en armadura longitudinal $\geq 15\%$ Afección severa de cercos Necesidad de refuerzo estructural CFRP (lámina + hoja) *Medido previo cepillado de la armadura
Estadio F4 - Elemento no funcional
Indicadores característicos Pérdida elevada y generalizada de sección en armaduras principales Daños generalizados en zonas críticas Afección simultánea y extensa de armadura longitudinal y transversal
Criterios relevantes %Superficie afectada por corrosión $> 50\%$ Necesidad de refuerzo estructural CFRP (lámina + hoja) Imposibilidad de garantizar la seguridad de la estructura en servicio

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION

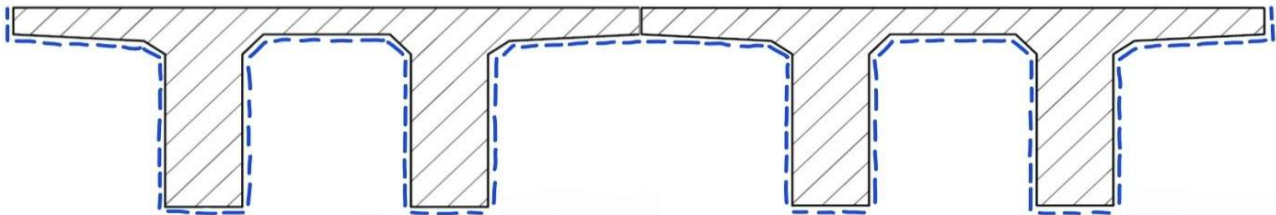
SUPERFICIE AFECTADA POR EFECTOS DE LA CORROSION (%)

*(1) Superficie total del elemento = m2
 (2) Superficie con patologías atribuibles a la corrosión = m2
 (3) %Superficie afectada = $\frac{(2)}{(1)} * 100 =$

*(1) Superficie total del elemento
 a) un unico tablero de viga π



b) dos tableros de vigas π, sin tomar en cuenta la parte superior del tablero



PERDIDA DE SECCION ARMADURA LONGITUDINAL (%)

(4) Diámetro inicial* = mm.
 (5) Diámetro actual** = mm.
 (6) %Pérdida de sección = $\left[1 - \left(\frac{(5)}{(4)} \right)^2 \right] * 100 =$

*Obtenido de documentación previa/planos/informes

**Previo cepillado

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION

SOLO PROCEDER SI (6) ≥ 15%

SUPERFICIE A REFORZAR CON CFRP (refuerzo con fibra de carbono)

(7) Superficie donde se dispone CFRP lamina + malla*, unicamente en la cara inferior de los nervios que lo requieran

	m2
--	----

(8) Superficie donde se dispone CFRP solo malla**, unicamente en las caras laterales de los nervios que lo requieran

	m2
--	----

(9) %Superficie CFRP lamina + malla = $\frac{(7)}{(1)} * 100 =$

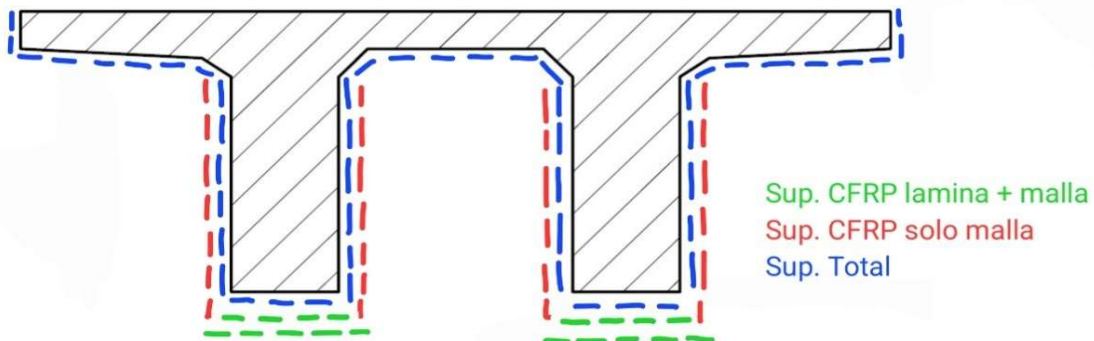
--

(10) %Superficie CFRP solo malla = $\frac{(8)}{(1)} * 100 =$

--

* Disposición de **CFRP lamina + malla** unicamente en cara inferior de nervios

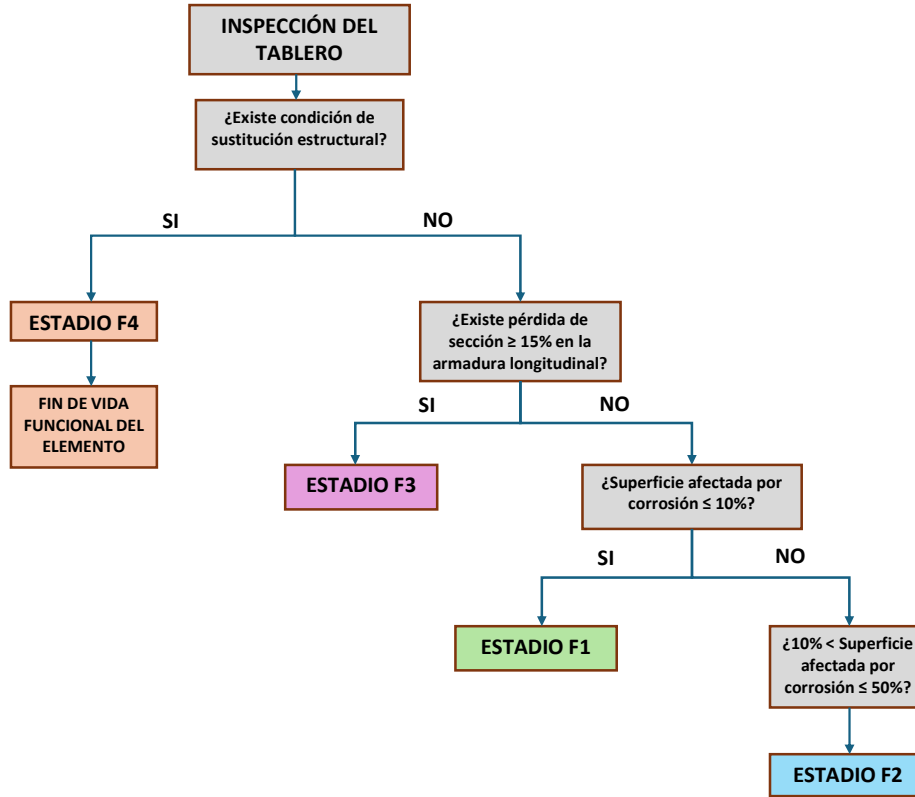
** Disposición **CFRP solo malla** en las caras laterales de nervios



*** Si la estructura esta compuesta por dos tableros de vigas π se calcula en relación a la superficie definida en *(1)b)

DIAGRAMA DE DECISION

Habiendo obtenido los datos se determina el estadio de degradacion del elemento



TIEMPO DE TRANSICION ENTRE ESTADIOS EN AMBIENTES SIN PRESENCIA DE CLORUROS

Armadura	F1 a F2 (años)	F2 a F3 (años)	F3 a F4*
Ø20 longitudinal	14	10	No sobrepasar
Ø10 transversal	6	5	No sobrepasar

*Si el elemento se encuentra en un estadio F3 la intervencion es prioritaria

TIEMPO DE TRANSICION ENTRE ESTADIOS EN AMBIENTES CON PRESENCIA DE CLORUROS

Si se considera un grado de exposición a cloruros de la estructura, se debe dividir el tiempo de transición definido entre un valor α comprendido en un rango de entre 4 y 8 dependiendo el grado de exposición.

Ambientes que favorecen el ataque por efecto de cloruros:

Ambientes marinos, atmósfera con sales, salpicaduras por sales fundentes, filtraciones de aguas o escorrentías con cloruros disueltos.

Factores que amplifican la corrosión localizada

Ciclos de humedad-secado, fisuración previa del recubrimiento, bajo recubrimiento efectivo, puntos de picadura del acero (soldaduras, empalmes, cambios de sección)

Nombre estructura:
Fecha de inspección:

VALORACIÓN DEL COSTE ECONÓMICO DE LA INTERVENCIÓN EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE COSTE ECONÓMICO

Unidad	Actuación	Precio unitario (€/m ²)
CE1	Picado mecánico de superficie de hormigón	39.39
CE2	Chorro de armaduras	14.85
CE3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	12.65
CE4	Reconstrucción con mortero R4	129.77
CE5	Inhibidor de corrosión	48.86
CE6	Pintura anticarbonatación	13.70
CE7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	1558.17
CE7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	138.38

Para estimar el coste total de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 = _____ (€/m ²)	
Coste total de la intervención = (11) x (1) = _____ €	
(3) = Superficie afectada ≤10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 = _____ (€/m ²)	
Coste total de la intervención = (12) x (1) = _____ €	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 + (9) x CE7.1 + (10) x CE7.2 = _____ (€/m ²)	
Coste total de la intervención = (13) x (1) = _____ €	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El coste de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

VALORACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA INTERVENCIÓN EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Unidad	Actuación	*PCG (kg CO2 eq/m2)
IA1	Picado mecánico de superficie de hormigón	3.82
IA2	Chorro de armaduras	2.19
IA3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	2.57
IA4	Reconstrucción con mortero R4	19.58
IA5	Inhibidor de corrosión	0.37
IA6	Pintura anticarbonatación	1.26
IA7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	54.76
IA7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	5.52

*Potencial de Calentamiento Global

Para estimar el impacto ambiental de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada ≤10%, expresada en terminos relativos (1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos (1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 + (9) x IA7.1 + (10) x IA7.2 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos (9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos (10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos (1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El impacto ambiental de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

**ANEXO III: VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA
MEDIANTE LA APLICACIÓN A CASOS REALES**

1. Objetivo del Anexo

Este anexo se presenta como un documento complementario al apartado 5 “Validación de propuesta: Metodología por aplicación a casos reales”. Donde se aplica la ficha integrada de evaluación del estado de degradación propuesta como herramienta para evaluar el coste económico y ambiental en una estructura.

En el apartado 5 esta herramienta se aplica al “Paso inferior sobre la carretera CR-502. Línea Puertollano-Refinería P.K. 3+075” y en este anexo, siguiendo la misma línea, se aplica dicha herramienta a otras dos estructuras con el objetivo de realizar un proceso de validación más robusto y fiable.

2. Caso real: Puente sobre el Río Corbones. Línea Alcázar de San Juan–Sevilla P.K. 528+518

2.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta

La estructura que se utiliza para realizar la evaluación es el Puente sobre el Río Corbones en la línea Alcázar de San Juan-Sevilla PK 528+518. La obra se compone de un solo vano que conforma el tramo de aproximación del estribo Alcázar de San Juan al puente metálico sobre el Río Corbones.

La estructura se compone de dos vigas en π de hormigón armado, con un esviaje de 45°, con una luz libre según el esviaje de 11,28 m, y un canto de aproximadamente 1,62 m. Las vigas cuentan con una anchura de 5,60 m y se encuentran separadas 0,40 m, y cada una soporta una de las vías férreas.

Los trabajos realizados para poner freno al deterioro que sufría la estructura y devolverla a un buen estado de conservación han sido los siguientes:

- Saneamiento, repicado, limpieza y protección de la armadura y recomposición de elementos de hormigón armado.
- Aplicación de un sistema de protección a toda la estructura que consiste en la aplicación de inhibidor de corrosión y una capa de pintura anticarbonatación en los paramentos de hormigón.

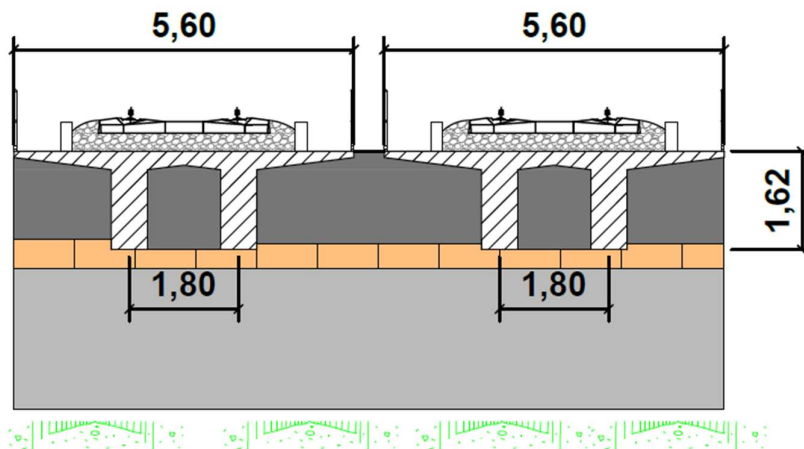
Estado previo a reparación



Estado posterior a reparación



Sección transversal del tablero tipo π



2.2 Coste económico real de la intervención

A continuación, se muestra una tabla correspondiente a la relación valorada una vez finalizada la obra donde se puede ver que el coste total de estas actuaciones es de 29,291.68€.

UD	Actuación	Medición					Precio unitario	Total
		Num.	Largo	Ancho	Alto	Total		
m2	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	4	13.75	1.20	1.00	66.00	38.76 €	2,558.16 €
m2	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	2	13.75	11.20	1.00	308.00	11.18 €	3,443.44 €
m2	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	4	13.75	1.20	1.00	66.00	13.91 €	918.06 €
m2	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m2 por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm2, y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	4	13.75	1.20	1.00	66.00	102.23 €	6,747.18 €
m2	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasiva la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm2, no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m2, previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	2	13.75	11.20	1.00	308.00	39.76 €	12,246.08 €
m2	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m2 en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	2	13.75	11.20	1.00	308.00	10.97 €	3,378.76 €
TOTAL								29,291.68€

2.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)

Para garantizar la comparabilidad entre los costes reales de la intervención ejecutada en el año 2020 y los costes estimados mediante la Base de Precios de ADIF con valores actualizados a 2025, se realiza la actualización de los precios mediante el Índice de Precios al Consumo (IPC) publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

La aplicación del IPC en este contexto permite trasladar los costes de una actuación ejecutada en un momento determinado a valores monetarios equivalentes en un año posterior, eliminando el efecto de inflación acumulada.

De acuerdo con los datos oficiales del INE, la variación anual del IPC general en España ha sido aproximadamente la siguiente:

Año	Variación IPC (%)
2021	0.5%
2022	6.1%
2023	5.9%
2024	3.4%
2025	2.9%

Tabla 17 Variaciones del Índice de Precios al Consumo (INE, 2025)

A partir de estas variaciones anuales y aplicando el incremento acumulado de manera compuesta al coste de la reparación en el año 2020 de 29,291.68€ se obtiene un coste actualizado a 2025 de 35,193.11€

Este ajuste permite realizar una comparación más coherente entre el coste real de la intervención y los costes estimados mediante la herramienta desarrollada en este trabajo, eliminando el efecto de la inflación y centrando la comparación en la consistencia del modelo propuesto.

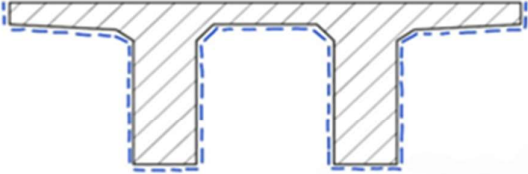
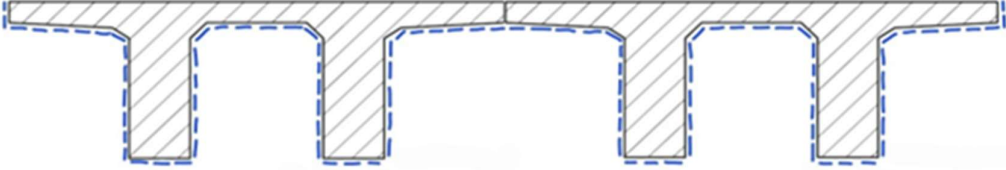
2.4 Aplicación de la ficha del estado de degradación

Por otro lado, se procede a rellenar la ficha integrada de evaluación del estado de degradación adjunta en el Anexo II como si fuera una inspección realizada en campo y se obtienen los siguientes resultados:

Nombre estructura: Puente sobre el Río Corbones. PK.528+518

FICHA Nº2

Fecha de inspección: XX/XX/XX

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION	
SUPERFICIE AFECTADA POR EFECTOS DE LA CORROSION (%)	
*(1) Superficie total del elemento =	308 m ²
(2) Superficie con patologías atribuibles a la corrosión =	66 m ²
(3) % Superficie afectada = $\frac{(2)}{(1)} \times 100 =$	21.43%
*(1) Superficie total del elemento	
a) un unico tablero de viga π	
	
b) dos tableros de vigas π, sin tomar en cuenta la parte superior del tablero	
	
PERDIDA DE SECCION ARMADURA LONGITUDINAL (%)	
(4) Diámetro inicial* =	20 mm.
(5) Diámetro actual** =	20 mm.
(6) % Pérdida de sección = $\left[1 - \left(\frac{(5)}{(4)} \right)^2 \right] \times 100 =$	0.00%
*Obtenido de documentación previa/planos/informes	
**Previo cepillado	

Nombre estructura: Puente sobre el Río Corbones. PK.528+518
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA Nº4

VALORACION DEL COSTE ECONOMICO DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE COSTE ECONOMICO

Unidad	Actuación	Precio unitario (€/m ³)
CE1	Picado mecánico de superficie de hormigón	39.39
CE2	Chorro de armaduras	14.85
CE3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	12.65
CE4	Reconstrucción con mortero R4	129.77
CE5	Inhibidor de corrosión	48.86
CE6	Pintura anticarbonatación	13.70
CE7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	1558.17
CE7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	138.38

Para estimar el coste total de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada ≤ 10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> 104.70 (€/m ²)
Coste total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> 32248.91 €	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 + (9) x CE7.1 + (10) x CE7.2 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El coste de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar y tomando como referencia los datos obtenidos de la ficha el coste de intervenir en esta estructura es de 32,248.91€.

2.5 Conclusiones en cuanto al impacto económico

Comparando el coste real proveniente de la relación valorada a fin de obra de 29.291,68€, actualizada mediante el IPC a 35,193.11€ y el coste proveniente de la ficha de 32,248.91€ se puede ver que son costes similares.

Tomando en cuenta que la reparación de la estructura se realizó en 2020 en base a una tabla de precios de esa época y que la ficha está basada en la BPA de ADIF a 2025, se ve que hay una diferencia de 5 años en la que los precios de cada unidad de obra se han ajustado al alza. Por lo que es razonable que haya un incremento de coste de 2.957,23€ o del 10% en términos porcentuales.

Por otro lado, se puede ver que, en base a los criterios de los estadios definidos, esta estructura está claramente situada en el estadio F2. Por lo que en base a la ficha número 3 dispuesta en el Anexo II, existe un periodo temporal medio de 10 años en el cual la estructura pasará de un estadio F2 a un estadio F3.

2.6 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta

Si bien, como se ha establecido en el apartado 5.4 del trabajo no es posible validar el modelo mediante la comparación entre el impacto ambiental realmente producido al momento de intervenir en la estructura y el impacto ambiental que se obtendría mediante el uso de la ficha debido a la falta de información al momento de la intervención en la estructura. Se procede a obtener el impacto ambiental utilizando esta herramienta para tener un orden de magnitud de lo que esta intervención implicaría en base a las premisas establecidas para la valoración del impacto ambiental en potencial de calentamiento global (kg CO₂ eq).

VALORACION DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Unidad	Actuación	*PCG (kg CO2 eq/m2)
IA1	Picado mecánico de superficie de hormigón	3.82
IA2	Chorro de armaduras	2.19
IA3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	2.57
IA4	Reconstrucción con mortero R4	19.58
IA5	Inhibidor de corrosión	0.37
IA6	Pintura anticarbonatación	1.26
IA7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	54.76
IA7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	5.52

*Potencial de Calentamiento Global

Para estimar el impacto ambiental de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada ≤ 10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> 7.66 (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> 2360.72 kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 + (9) x IA7.1 + (10) x IA7.2 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El impacto ambiental de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar el impacto ambiental total de esta intervención expresado en potencial de calentamiento global es de 2,360.72 kg de CO₂ eq. Es importante recalcar que si bien a primera vista el impacto ambiental es parecido al de la primera estructura analizada en el apartado 5.5 del presente trabajo (paso inferior sobre la carretera CR-502), estando en un estadio más temprano como lo es el F2 frente a un estadio más tardío como lo es el F3, es importante recalcar que el puente sobre el Río Corbones tiene una superficie tres veces mayor que el paso inferior sobre la carretera CR-502

3. Caso real: Puente sobre el río mayor. Línea Aranjuez-Utiel P.K. 100+370

3.1 Descripción general de la estructura y patologías que presenta

La estructura que se utiliza para realizar la evaluación es el Puente sobre el Río Mayor en la línea de Aranjuez-Utiel en el PK 100+370. La estructura consta de once vanos isostáticos, con tableros de longitudes aproximadas de 11,75 m cada uno y luces libres de 10,22 m, formados por una única viga en π de hormigón armado, con una anchura total de 5,30 m.

Las vigas tienen un canto total de 1,40 m, y constan de dos nervios de 0,63 m de anchura, separados 1,05 m entre caras interiores, y con voladizos laterales de 1,50 m de espesor variable hasta un mínimo de 0,20 m en los extremos.

Los trabajos realizados para poner freno al deterioro que sufría la estructura y devolverla a un buen estado de conservación han sido los siguientes:

- Saneamiento, repicado, limpieza y protección de la armadura y recomposición de elementos de hormigón armado.
- Aplicación de un sistema de protección a toda la estructura que consiste en la aplicación de inhibidor de corrosión y una capa de pintura anticarbonatación en los paramentos de hormigón.

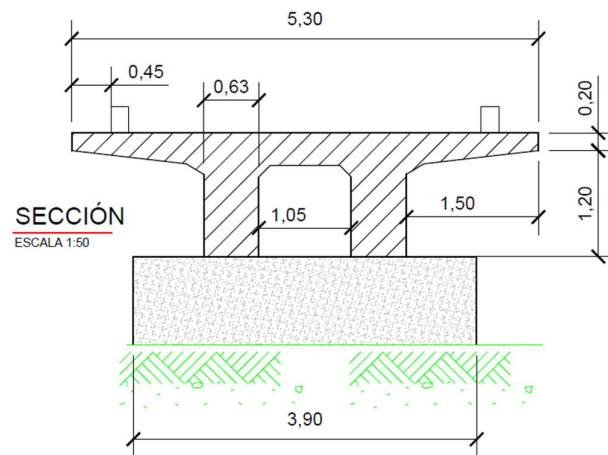
Estado previo a reparación



Estado posterior a reparación



Seccion transversal del tablero tipo π



3.2 Coste económico real de la intervención

A continuación, se muestra una tabla correspondiente a la relación valorada una vez finalizada la obra donde se puede ver que el coste total de estas actuaciones es de 29,291.68€.

UD	Actuación	Medición					Precio unitario	Total
		Num.	Largo	Ancho	Alto	Total		
m2	Picado mecánico de superficie de hormigón o fabrica hasta una profundidad de 40 mm, incluso posterior limpieza del soporte. Medida la superficie ejecutada. disposición de los medios de seguridad y protección reglamentarios, herramientas y medios auxiliares. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo	11	11.75	9.55	0.10	123.43	38.76 €	4,784.15 €
m2	Chorro de cualquier superficie, mediante proyección controlada de árido de cuarzo 1-3 mm, eliminando la lechada superficial, concreciones calcáreas, manchas y meteorizaciones y todos los restos de suciedad y grasas del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, limpieza, medios auxiliares, herramientas, maquinaria y mano de obra, así como acopios intermedios, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	11	11.75	9.55	1.00	1234.34	11.18 €	13,799.92 €
m2	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva de armaduras a base de cemento y resinas epoxi modificadas de tres componentes con inhibidor de la corrosión tipo SIKATOP 100 EPOCEM o similar (según UNE EN 1504-7). Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad, medios de seguridad y protección reglamentarios conforme a normativa vigente.	11	11.75	9.55	0.10	123.43	13.91 €	1,716.91 €
m2	Reconstrucción de sección de hormigón con un espesor de 4 cm, realizada con mortero tixotrópico monocomponente de clase R4 (según UNE EN 1504-3), resistente a los sulfatos, de elevada resistencia mecánica, de elevado módulo y con retracción compensada, con un consumo de 1,9 Kg/m2 por cada mm de espesor y una resistencia a compresión a las 24 horas >18 N/mm2, y un módulo E>20.000 MPa, según UNE-EN 13412. Incluido parte proporcional de replanteo, perfilado de aristas y acabado fratasado manual, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	11	11.75	9.55	0.10	123.43	102.23 €	12,618.25 €
m2	Inhibidor de corrosión en hormigón armado o pretensado, incoloro de muy baja viscosidad (aprox. 0,95 mPas) a base de silano organofuncional, permeable al vapor de agua (según UNE EN 1504 - 2), totalmente terminado. Reacciona químicamente con el cemento (reduce la absorción de agua) y el acero (repasa la armadura), reduciendo la corrosión por debajo de 0,2 µA/cm2, no se lava y de larga duración, reduciendo la corrosión hasta un 92% según FHWA, sobre paramentos verticales y horizontales de hormigón, aplicable de 2 a 3 capas a rodillo o brocha con un consumo total de 600 gr/m2, previa limpieza del soporte. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	11	11.75	9.55	1.00	1234.34	39.76 €	49,077.36 €
m2	Pintura anticarbonatación de hormigón armado, a base de pintura de resinas acrílicas en dispersión acuosa, totalmente terminado. Aplicado sobre el soporte sano, compacto, limpio y exento de polvo, suciedad, lechadas superficiales y partículas, manualmente mediante pincel, brocha o rodillo de pelo corto, sin diluir o por proyección mediante equipo air-less disuelto con un 2% de agua en tres capas con un rendimiento de 200 g/m2 en cada capa de 60 micras de espesor. Medida la superficie aplicada. Incluido parte proporcional de replanteo, medios auxiliares, herramientas, maquinaria, materiales y mano de obra, control y aseguramiento de la calidad. Trabajo: Diurno. Banda de mantenimiento: No necesita intervalo.	11	11.75	9.55	1.00	1234.34	10.97 €	13,540.71 €
							TOTAL	95,537.30€

3.3 Actualización de los costes mediante índice de precios al consumo (IPC)

Para garantizar la comparabilidad entre los costes reales de la intervención ejecutada en el año 2020 y los costes estimados mediante la Base de Precios de ADIF con valores actualizados a 2025, se realiza la actualización de los precios mediante el Índice de Precios al Consumo (IPC) publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

La aplicación del IPC en este contexto permite trasladar los costes de una actuación ejecutada en un momento determinado a valores monetarios equivalentes en un año posterior, eliminando el efecto de inflación acumulada.

De acuerdo con los datos oficiales del INE, la variación anual del IPC general en España ha sido aproximadamente la siguiente:

Año	Variación IPC (%)
2020	1.1%
2021	0.5%
2022	6.1%
2023	5.9%
2024	3.4%
2025	2.9%

Tabla 18 Variaciones del Índice de Precios al Consumo (INE, 2025)

A partir de estas variaciones anuales y aplicando el incremento acumulado de manera compuesta al coste de la reparación en el año 2019 de 95,537.30€ se obtiene un coste actualizado a 2025 de 115,724.33€

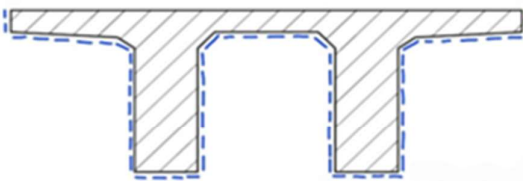
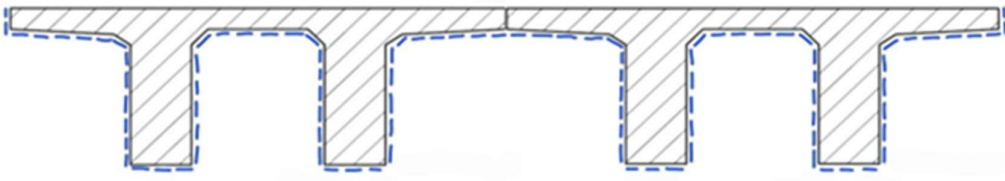
Este ajuste permite realizar una comparación más coherente entre el coste real de la intervención y los costes estimados mediante la herramienta desarrollada en este trabajo, eliminando el efecto de la inflación y centrando la comparación en la consistencia del modelo propuesto.

3.4 Aplicación de la ficha del estado de degradación

Por otro lado, se procede a rellenar la ficha integrada de evaluación del estado de degradación adjunta en el Anexo II como si fuera una inspección realizada en campo y se obtienen los siguientes resultados:

Nombre estructura: Puente sobre el Río Mayor. PK.100+370
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA Nº2

DATOS A OBTENER DURANTE LA INSPECCION	
SUPERFICIE AFECTADA POR EFECTOS DE LA CORROSION (%)	
*(1) Superficie total del elemento =	<input style="width: 80px;" type="text" value="1234.34"/> m ²
(2) Superficie con patologías atribuibles a la corrosión =	<input style="width: 80px;" type="text" value="123.43"/> m ²
(3) %Superficie afectada = $\frac{(2)}{(1)} * 100 =$	<input style="width: 80px;" type="text" value="10.00"/>
*(1) Superficie total del elemento	
a) un unico tablero de viga π	
	
b) dos tableros de vigas π, sin tomar en cuenta la parte superior del tablero	
	
PERDIDA DE SECCION ARMADURA LONGITUDINAL (%)	
(4) Diámetro inicial* =	<input style="width: 80px;" type="text" value="20"/> mm.
(5) Diámetro actual** =	<input style="width: 80px;" type="text" value="20"/> mm.
(6) %Pérdida de sección = $\left[1 - \left(\frac{(5)}{(4)} \right)^2 \right] * 100 =$	<input style="width: 80px;" type="text" value="0.00"/>
*Obtenido de documentación previa/planos/informes	
**Previo cepillado	

Nombre estructura: Puente sobre el Río Mayor. PK.100+370
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA N°4

VALORACION DEL COSTE ECONOMICO DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE COSTE ECONOMICO

Unidad	Actuación	Precio unitario (€/m ²)
CE1	Picado mecánico de superficie de hormigón	39.39
CE2	Chorro de armaduras	14.85
CE3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	12.65
CE4	Reconstrucción con mortero R4	129.77
CE5	Inhibidor de corrosión	48.86
CE6	Pintura anticarbonatación	13.70
CE7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	1558.17
CE7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	138.38

Para estimar el coste total de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada ≤ 10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 =	82.23 (€/m ²)
Coste total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> 101494.84 €	
(3) = Superficie afectada > 10% y ≤ 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) Coste de la intervención (€/m ²) = (3) x (CE1 + CE2 + CE3 + CE4) + CE5 + CE6 + (9) x CE7.1 + (10) x CE7.2 =	<input type="text"/> (€/m ²)
Coste total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> €	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+malla, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo malla, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El coste de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar y tomando como referencia los datos obtenidos de la ficha el coste de intervenir en esta estructura es de 101,494.84€.

3.5 Conclusiones en cuanto al impacto económico

Comparando el coste real proveniente de la relación valorada a fin de obra de 95,537.30€, actualizada mediante el IPC a 115,724.33€ y el coste proveniente de la ficha de 101,494.84€ se puede ver que son costes similares.

Tomando en cuenta que la reparación de la estructura se realizó en 2019 en base a una tabla de precios de esa época y que la ficha está basada en la BPA de ADIF a 2025, se ve que hay una diferencia de 5 años en la que los precios de cada unidad de obra se han ajustado al alza. Por lo que es razonable que haya un incremento de coste de 5.957,54€ o del 6.20% en términos porcentuales.

Por otro lado, se puede ver que, en base a los criterios de los estadios definidos, esta estructura se sitúa en el límite entre un estadio de degradación F1 y un estadio de degradación F2, siguiendo el criterio definido en el apartado 3.6.6.4 de situaciones frontera, se asume el estadio inmediatamente superior permaneciendo así bajo la lógica de mantenimiento preventivo aplicado a lo largo del presente trabajo. Habiendo definido que la estructura se encuentra en el estadio de degradación F2 y en base a la ficha número 3 dispuesta en el Anexo II, existe un periodo temporal medio de 10 años en el cual la estructura pasará de un estadio F2 a un estadio F3.

3.6 Impacto ambiental de la intervención mediante la aplicación de la herramienta

Si bien, como se ha establecido en el apartado 5.4 del trabajo no es posible validar el modelo mediante la comparación entre el impacto ambiental realmente producido al momento de intervenir en la estructura y el impacto ambiental que se obtendría mediante el uso de la ficha debido a la falta de información al momento de la intervención en la estructura. Se procede a obtener el impacto ambiental utilizando esta herramienta para tener un orden de magnitud de lo que esta intervención implicaría en base a las premisas establecidas para la valoración del impacto ambiental en potencial de calentamiento global (kg CO₂ eq).

Nombre estructura: Puente sobre el Río Mayor. PK.100+370
 Fecha de inspección: XX/XX/XX

FICHA Nº4

VALORACION DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA INTERVENCION EN BASE AL ESTADIO DEFINIDO

TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Unidad	Actuación	*PCG (kg CO2 eq/m2)
IA1	Picado mecánico de superficie de hormigón	3.82
IA2	Chorro de armaduras	2.19
IA3	Aplicación manual de imprimación anticorrosiva	2.57
IA4	Reconstrucción con mortero R4	19.58
IA5	Inhibidor de corrosión	0.37
IA6	Pintura anticarbonatación	1.26
IA7.1	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Long. + CFRP Transv.	54.76
IA7.2	Refuerzo mediante fibra de carbono: CFRP Transv.	5.52

*Potencial de Calentamiento Global

Para estimar el impacto ambiental de la reparación de la estructura es necesario haber obtenido todos los datos de las anteriores fichas

ESTADIO F1	
(11) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (11) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada < 10%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F2	
(12) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 =	<input type="text"/> 4.45 (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (12) x (1) = <input type="text"/> 5487.88 kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada > 10% y <= 50%, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F3	
(13) PCG (kg CO2 eq/m2) = (3) x (IA1 + IA2 + IA3 + IA4) + IA5 + IA6 + (9) x IA7.1 + (10) x IA7.2 =	<input type="text"/> (kg CO2 eq/m2)
PCG total de la intervención = (13) x (1) = <input type="text"/> kg CO2 eq	
(3) = Superficie afectada, expresada en terminos relativos	
(9) = Superficie donde se dispone CFRP lamina+mallá, expresada en terminos relativos	
(10) = Superficie donde se dispone CFRP solo mallá, expresada en terminos relativos	
(1) = Superficie total del elemento	

ESTADIO F4	
El impacto ambiental de la intervención no depende únicamente de las actuaciones a realizar, sino también de las afecciones a la circulación, falta de garantía de seguridad y durabilidad para la estructura y sus usuarios.	

Como se puede observar el impacto ambiental total de esta intervención expresado en potencial de calentamiento global es de 5,487.88 kg de CO₂ eq. Si bien a primera vista parece un impacto ambiental significativo comparado con los otros casos evaluados y más aun tomando en cuenta que la estructura se encuentra en un estadio F2, es importante recalcar que dicha estructura está compuesta por 11 vanos, dando lugar a una superficie de actuación extensa comparada con las otras estructuras objeto de estudio del presente trabajo.