

Sostenibilidad y resiliencia en estructuras de edificación con forjados con losas aligeradas multiaxiales

Sustainability and resilience in building structures with multiaxial lightened slab floors

Antonio J. Sánchez-Garrido^a, Ignacio J. Navarro Martínez^b, Víctor Yepes^c

^aMSc. Arquitecto. Dpto. Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València.

^{*}Autor para correspondencia. Correo electrónico: aisangar@doctor.upv.es

^cDr. Ingeniero de Caminos. Dpto. Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València.

^cDr. Ingeniero de Caminos. Catedrático de Universidad. ICITECH. Universitat Politècnica de València.

RESUMEN

Los Métodos Modernos de Construcción (MMC) están revolucionando la industria al ofrecer soluciones sostenibles que reducen el impacto ambiental en el ciclo de vida de los edificios. Un ejemplo son las losas aligeradas biaxiales de hormigón, que optimizan el uso de materiales. Sin embargo, la corrosión en entornos agresivos supone un desafío importante para la resiliencia de estas estructuras. Este estudio propone una metodología para evaluar estrategias de mantenimiento reactivo en MMC expuestas a cloruros, analizando seis alternativas de diseño y utilizando un modelo FUCOM-TOPSIS para integrar criterios de sostenibilidad económica y medioambiental.

ABSTRACT

Modern Methods of Construction (MMC) are revolutionizing the industry by offering sustainable solutions that reduce the environmental impact over the life cycle of buildings. One example is lightweight biaxial concrete slabs, which optimize the use of materials. However, corrosion in aggressive environments poses a significant challenge to the resilience of these structures. This study proposes a methodology to evaluate reactive maintenance strategies in MMCs exposed to chlorides, analyzing six design alternatives and using a FUCOM-TOPSIS model to integrate economic and environmental sustainability criteria.

PALABRAS CLAVE: sostenibilidad, métodos modernos de construcción, losa aligerada multiaxial, mantenimiento, corrosión, ciclo de vida.

KEYWORDS: sustainability, modern methods of construction, multiaxial lightened slab, maintenance, corrosion, life cycle.

1. Introducción

En las últimas décadas, la construcción se ha convertido en la industria más grande del mundo, representando en 2023 alrededor del 13% del Producto Interno Bruto (PIB) global y generando el 39% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, además de un alto

consumo de recursos y residuos, según McKinsey Global [1]. Este crecimiento se debe a la rápida urbanización y a la creciente demanda de infraestructuras, muchas de las cuales no cumplen los principios de sostenibilidad. En este contexto, los Objetivos

de Desarrollo Sostenible [2] subrayan la importancia del mantenimiento de estructuras y lo consideran esencial para reducir su impacto ambiental durante todo su ciclo de vida. Así, la gestión del mantenimiento no solo se centra en el rendimiento estructural, sino que también busca mejorar la eficiencia de los recursos y minimizar los residuos, lo que promueve un enfoque más sostenible en la industria.

El mantenimiento efectivo de las infraestructuras es esencial para optimizar su ciclo de vida y controlar los costes asociados. Diversos estudios han evidenciado que la predicción del mecanismo de deterioro [3] o una combinación adecuada de las actividades de mantenimiento [4] no solo aumentan la durabilidad y seguridad de las infraestructuras, sino que también generan ahorros significativos en gastos de reparación durante su vida útil.

Por su parte, es esencial considerar aspectos medioambientales en la planificación del mantenimiento para minimizar la huella ecológica de las infraestructuras [5]. En los últimos años, se ha optimizado la energía incorporada en puentes de losa pretensada mediante redes neuronales y metamodelos [6] y se han desarrollado estrategias para reducir las emisiones de CO₂ asociadas al mantenimiento y rehabilitación de pavimentos de carreteras [7]. Mediante análisis del ciclo de vida se ha podido evaluar el impacto ambiental de diseños preventivos contra la corrosión de puentes de hormigón pretensado [8], y rediseñar incluso un puente de hormigón en ambiente costero mediante la predicción de su durabilidad utilizando métodos no destructivos para la detección de daños [9]. Los Métodos Modernos de Construcción (MMC) [10] también desempeñan un papel crucial en este contexto, ya que permiten mejorar la eficiencia de las edificaciones y reducir su huella ecológica, lo que conlleva una menor energía incorporada y menos residuos durante el ciclo de vida de las estructuras.

Sin embargo, la optimización de costes o del impacto ambiental en la construcción por sí sola no es suficiente para abordar las demandas

actuales a largo plazo. Por tanto, es fundamental adoptar un enfoque holístico que integre la eficiencia económica y la calidad ambiental para garantizar infraestructuras resilientes y sostenibles.

Uno de los desafíos más importantes a lo largo de la vida útil de una estructura es la corrosión, una patología muy habitual en edificaciones costeras. Este fenómeno, que es progresivo, no solo afecta a la integridad estructural, sino que también aumenta la vulnerabilidad de la edificación ante cargas accidentales, como sismos e incendios [11]. Con el tiempo, la corrosión puede reducir drásticamente la durabilidad de las estructuras, lo que genera riesgos personales significativos y costosas reparaciones. Por lo tanto, optimizar el mantenimiento en entornos agresivos es una necesidad imperante para garantizar un futuro sostenible. Sin embargo, este proceso debe incluir no solo la preservación de la funcionalidad estructural bajo restricciones presupuestarias, sino también prácticas que mitiguen el impacto medioambiental al mismo tiempo. En este sentido, es fundamental adoptar un enfoque multidimensional en el diseño de las estructuras para concebir estrategias de mantenimiento preventivo o reactivo contra mecanismos de deterioro específicos [12]. El sector de la construcción ha tendido históricamente a centrarse demasiado en reducir el impacto inicial de los proyectos, descuidando el mantenimiento y la gestión al final de la vida útil de las estructuras. Esta falta de atención a la sostenibilidad a largo plazo puede ocasionar costes elevados y un deterioro prematuro.

Este artículo presenta una metodología para evaluar la sostenibilidad de las estrategias de mantenimiento reactivo en estructuras de hormigón armado que utilizan MMC en entornos expuestos a cloruros. Se analizarán los resultados de optimización al considerar simultáneamente las dimensiones económica y medioambiental, lo que permitirá identificar las mejores prácticas para una gestión del mantenimiento más sostenible.

2. Metodología

2.1 Objeto y ámbito de aplicación

Para mejorar la durabilidad del hormigón en entornos marítimos, este estudio examina cinco alternativas que se comparan con el diseño base de un edificio hotelero situado en la costa de Sancti Petri (Chiclana de la Frontera, Cádiz). El diseño estándar (BAS) consta de un módulo de tres plantas con habitaciones y una azotea no transitable acabada en grava. La estructura incluye una cimentación de losa y tres forjados de losas aligeradas biaxiales (Figura 1), que se construyen in situ mediante un método innovador basado en MMC (métodos modernos de construcción), empleando formadores huecos de polietileno de alta densidad (Figura 2), conocidos como "losas UNIDOME" [13]. Este sistema, al ser más eficiente y al reducir el peso propio, consigue un mayor rendimiento estructural con luces y/o cargas superiores a las de una estructura convencional equivalente.

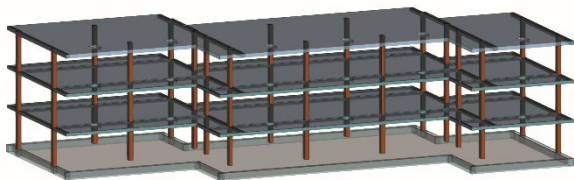


Figura 1. Modelo estructural 3D de la alternativa base (BAS).

Las alternativas preventivas propuestas en este estudio se han centrado en aumentar la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros y, por tanto, a la corrosión asociada, con el fin de prolongar su vida útil. La primera opción es modificar la mezcla del hormigón incorporando un 20 % de cenizas volantes (FA20) como aditivo. Estas no solo mejoran la trabajabilidad del hormigón, sino que también contribuyen a la formación de compuestos que reducen su permeabilidad, lo que aumenta su durabilidad frente a la penetración de cloruros.

Otra técnica que se está evaluando es la producción de hormigón más compacto, que logra una reducción de la relación agua-cemento de 0,60 a 0,50 (alternativa WCR). Esta

disminución mejora la densidad del hormigón y, por ende, su resistencia mecánica y durabilidad, y lo hace menos susceptible a la corrosión. Además, se propone aumentar el recubrimiento del hormigón de 3 a 4,5 cm (alternativa CR45). Este incremento en el recubrimiento proporciona una barrera adicional que protege la armadura de acero de la acción corrosiva del ambiente costero. Cuanto mayor sea el recubrimiento, mayor será la protección contra los agentes externos, lo que prolongará la vida útil del material. También se sugiere la aplicación de un inhibidor de corrosión hidrófugo conocido como ACHI. Este tipo de aditivo forma una película protectora sobre las superficies del hormigón que reduce la penetración de agua y cloruros, y mitiga así el riesgo de corrosión de las armaduras internas. Por último, se plantea sustituir el acero corrugado convencional utilizado en los refuerzos pasivos por acero inoxidable. Aunque este material es más costoso, no requiere mantenimiento, lo que puede suponer un ahorro a largo plazo al reducir la necesidad de reparaciones.

Para la fase de mantenimiento se plantean tres estrategias de reparación acorde al grado de daño en función del tiempo según el modelo de deterioro definido en la Sección 3, a saber, reposición del recubrimiento (común a todas), saneado del refuerzo y sustitución de la armadura.

El presente estudio evalúa los impactos económicos y ambientales del ciclo de vida asociados a la unidad funcional definida como cada metro cuadrado de estructura repercutida del módulo hotelero descrito, que abarca una superficie total de 2132 m² para una vida útil de 100 años. Para tener una perspectiva más amplia y realista de la edificación, se ha considerado el doble de la duración estándar estimada, 50 años, según las normativas nacionales. Se ha adoptado un enfoque «de la cuna a la puerta» para evaluar los impactos de las actividades de construcción y mantenimiento.



Figura 2. Losa aligerada biaxial “Unidome”.

2.2 Evaluación de los impactos

Los dos primeros impactos (criterios) están relacionados con la dimensión económica de la sostenibilidad y tienen en cuenta, respectivamente, los costes económicos derivados de la construcción (C1) y el mantenimiento periódico de cada diseño (C2). Para calcular estos últimos, aunque desde una perspectiva privada se prefieren altas tasas de descuento para priorizar costes a corto plazo, se elige una tasa de descuento social baja, del 2 %, enfocándose en la sostenibilidad [14].

Por otro lado, la dimensión ambiental se analiza siguiendo la metodología ReCiPe 2016 [15]. Este enfoque permite identificar los impactos sobre la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de recursos naturales, y garantizar que se tengan en cuenta todos los factores relevantes para el medio ambiente. De manera análoga a la evaluación económica, se han definido dos criterios ambientales que permiten convertir el daño potencial a largo plazo en una puntuación final. Estos criterios distinguen entre el consumo de recursos y las emisiones generadas durante la fase de construcción de la estructura (C3) y aquellas que se producen durante los diversos ciclos de reparación a lo largo de su vida útil (C4). Esta diferenciación es crucial para obtener una visión más clara del impacto ambiental en cada etapa del ciclo de vida del proyecto.

Para obtener información más detallada y ampliar las bases de datos empleadas para el

análisis económico y ambiental realizado en este estudio, se recomienda consultar el trabajo de Sánchez-Garrido et al. [16].

La evaluación de la sostenibilidad se realiza teniendo en cuenta cuatro categorías de impacto. Para abordar la posible contradicción entre los criterios seleccionados, se utiliza una técnica de toma de decisiones multiatributo para resolver problemas discretos. Antes se determina la importancia relativa de cada criterio mediante el método de coherencia total (FUCOM) [17], lo que permite asignarles una relevancia en la decisión. Tras establecer esta jerarquía, se aplica la técnica TOPSIS [18] para identificar la alternativa de diseño óptima y el intervalo de mantenimiento que maximicen la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

2.3 Análisis de inventario

De acuerdo con la norma ISO 14040, para la evaluación del ciclo de vida, tanto económica como ambiental, se recopilan datos a partir de fuentes fiables. En este estudio, se han utilizado datos económicos de bases de datos oficiales del sector de la construcción en España, como «CYPE Ingenieros» [19], actualizadas hasta 2024, así como información proporcionada por proveedores. Los costes analizados incluyen materiales, mano de obra, equipos, maquinaria y otros gastos auxiliares directos.

Para la evaluación ambiental, se utilizó la base de datos Ecoinvent 3.2 [20] para recopilar los datos del inventario de cada alternativa (Tablas 1 y 2). Se aplicó un «criterio de corte» y se reconoció la naturaleza comparativa de la evaluación, por lo que se excluyeron del análisis los procesos estándar comunes a todas las alternativas [21]. Así, se omitieron las actividades relacionadas con el transporte de hormigón y acero desde proveedores cercanos (dentro de un radio de 50 km) y el suministro de cuerpos huecos de HDPE. Sin embargo, sí se tuvo en cuenta el transporte de materiales específicos, como las cenizas volantes, para los

que se requieren desplazamientos más largos. Además, siguiendo las directrices de las normas ISO 14040 e ISO 14044, no se tuvieron en cuenta factores que contribuyeran en menos de un 1% al impacto total. Por lo tanto, el

consumo de energía y combustible de la maquinaria utilizada en el proyecto no se consideró relevante, ya que las diferencias entre las alternativas eran mínimas.

Tabla 1: Flujos de materiales en cada diseño preventivo considerado en el ACV durante la etapa de construcción

Materiales	Unidades	1-BAS	2-FA20	3-WCR	4-CR45	5-ACHI	6-INOX
Cemento CEM I, CEM II/A	Kg/m ²	86,14	68,91	-	90,86	86,14	78,31
Cemento MR	Kg/m ²	-	-	93,97	-	-	-
Agua (hormigón)	litros/m ²	51,68	51,68	51,68	54,51	51,68	46,98
Arena	Kg/m ²	213,00	213,00	207,99	224,66	213,00	213,00
Grava	Kg/m ²	439,31	439,31	428,97	463,36	439,31	439,31
Cenizas volantes	Kg/m ²	-	17,23	-	-	-	-
Acero corrugado B500-S	Kg/m ²	27,52	27,52	27,52	27,52	27,52	-
Acero inox. B500-S	Kg/m ²	-	-	-	-	-	32,37
Polietileno alta dens. (HD PE)	m ³ /m ²	2,158E-05	2,158E-05	2,158E-05	2,158E-05	2,158E-05	2,158E-05
Impreg. base de silano	litros/m ²	-	-	-	-	0,99	-

Tabla 2: Flujos de materiales de cada diseño según la estrategia de mantenimiento reactivo considerado en el ACV

Reparación	Materiales	1-BAS	2-FA20	3-WCR	4-CR45	5-ACHI	6-INOX
1	Mortero tixotrópico 45 N/mm ²	15,23	15,23	15,23	23,20	15,23	12,69
	Agua (1 m ³ =1000 litros)	1,46	1,46	1,46	2,37	1,46	1,17
	Impreg. base de silano	-	-	-	-	0,29	-
2	Mortero tixotrópico 45 N/mm ²	20,31	15,23	20,31	27,92	20,31	17,77
	Agua (1 m ³ =1000 litros)	2,04	1,46	2,04	3,50	2,04	1,75
	Impreg. base de silano	-	-	-	-	0,29	-
3	Mortero tixotrópico 45 N/mm ²	25,39	25,39	25,39	33,00	20,31	22,85
	Agua (1 m ³ =1000 litros)	2,63	2,63	2,63	3,79	2,04	2,33
	Impreg. base de silano	-	-	-	-	0,29	-
	Acero barras corrugadas B 500 S	0,76	0,76	0,76	1,06	0,76	-

3. Optimización de la estrategia e intervalo de mantenimiento

Para determinar las necesidades de mantenimiento de las distintas opciones de diseño, se seleccionará un modelo de deterioro adecuado. En entornos marinos, el hormigón se deteriora cuando los iones cloruro penetran en su recubrimiento y alcanzan las armaduras de acero, lo que inicia el proceso de corrosión. Esta incursión puede destruir la capa pasiva protectora del acero, lo que permite la formación de óxido al entrar en contacto con la humedad y el oxígeno. La corrosión provoca expansiones y fisuras en el hormigón, lo que compromete su integridad estructural. Si no se toman medidas preventivas, puede ocasionar agrietamientos, pérdida de adherencia, pérdida

de la armadura y fallos estructurales. La vida útil de las armaduras afectadas por corrosión por cloruros, conforme al modelo de Tuutti (Figura 3), se expresa en la siguiente ecuación.

$$t_t = t_i + t_p \quad (1)$$

El período de iniciación (t_i) en elementos de hormigón ocurre cuando la concentración de cloruros es suficientemente alta como para iniciar el proceso de corrosión del acero, conocido como umbral crítico de cloruros (C_{cr}).

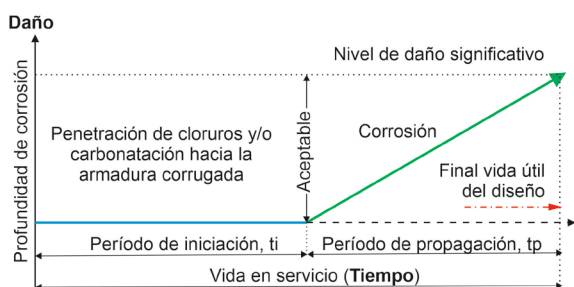


Figura 3. Modelo de Tuutti para predecir la vida útil de estructuras de hormigón en ambientes agresivos.

Para analizar la evolución del contenido de cloruros en el recubrimiento de hormigón a lo largo del tiempo, se utiliza el modelo de difusión de Fick, recomendado en el Boletín 34 de Fib [22]. Este estudio adapta el modelo para considerar el avance simultáneo de dos frentes de cloruros en las direcciones x e y , una situación que se presenta en las armaduras ubicadas en las esquinas. La concentración de cloruros, $C(x, y, t)$, en un momento específico t y a una profundidad (x, y) , puede evaluarse:

$$C(x, y, t) = C_s \left[1 - \frac{\text{erf } x}{2\sqrt{D_{0,x} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^\alpha \cdot t}} \cdot \frac{\text{erf } y}{2\sqrt{D_{0,y} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^\alpha \cdot t}} \right] \quad (2)$$

La concentración de cloruro en la superficie (wt%/aglomerante) se representa por C_s , mientras que la función de error gaussiana se denota por $\text{erf}(\cdot)$. El coeficiente de difusión del cloruro ($\text{mm}^2/\text{año}$) se denota por D_0 , y su valor se expresa en unidades de $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. El factor de edad se representa por α y se supone que es 0,5 según los códigos españoles. Por último, t_0 representa la duración temporal de 0,0767 años (28 días). La Tabla 3 muestra los valores de durabilidad para cada alternativa.

Durante un periodo prolongado, el proceso de corrosión por cloruros disminuye gradualmente la rigidez y el área de la sección transversal de las armaduras. El tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión

hasta la fisuración del recubrimiento se puede calcular a partir de la siguiente expresión conforme al Código Estructural [23]:

$$t_{fis,corr} = \frac{80 \cdot d}{\Phi \cdot V_{corr}} \quad (3)$$

Donde d es el espesor del recubrimiento de hormigón. V_{corr} es la velocidad de corrosión por cloruros, y d es el diámetro de la armadura. El período de propagación (t_p), definido como el tiempo desde que se inicia el daño hasta que se alcanza el umbral inadmisibles que define, en cada caso, el Estado Límite. El tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión hasta la pérdida de sección de armadura definida por un espesor $\Delta\Phi$, se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{sec,corr} = \frac{\Delta\Phi_{lim}}{V_{corr}} \quad (4)$$

Siendo $\Delta\Phi_{lim}$ la variación de diámetro debido a la corrosión de la armadura, que se considera inadmisibles, expresada en μm . En nuestro caso, adoptaremos como criterio discrecional que una pérdida de sección $\geq 15\%$ reduce significativamente la capacidad resistente de la barra, pudiendo afectar la seguridad, la rigidez y la durabilidad del forjado, lo que puede comprometer su desempeño estructural y aumentar el riesgo de fallos

Tabla 3. Parámetros de durabilidad para cada diseño.

Parameters	BAS	FA20	WCR	CR45	ACHI	INOX
C_{min} (kg/m ³)	275	220 ^e	300	275	275	275
C_{cr} (%)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.4 ^h
erf	0.752	0.849	0.713	0.753	0.753	0.362
C_s (%)	2.09	2.61	1.92	2.09	2.09	2.30
x (mm)	30	30	30	45	60 ^d	25
D_0 ($\times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$)	14.9	9	10.9	14.9	25	14.9
t_0 (years)	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
α	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
t_i (years)	9.3	15.7	21.6	47.0	52.8	83.8
d (mm)	30	30	30	45	60	25
Φ (mm)	12	12	12	12	12	12
v_{corr} ($\mu\text{m}/\text{year}$)	20	20	20	20	20	1 ⁱ
t_p (years)	10	10	10	15	20	166.7
t_L (years)	19.3	25.7	31.6	62.0	72.8	250.5

4. Resultados y discusión

4.1 Evaluación del coste del ciclo de vida (CCV)

La Figura 4 muestra los resultados de la evaluación económica del ciclo de vida de las seis opciones de diseño analizadas. Se incluyen los costes de construcción de una sección de tablero de 1 m de longitud y los gastos de mantenimiento en el intervalo óptimo durante su vida útil de 100 años.

El estudio identifica el recubrimiento CR45 como la mejor opción, un 59% más económica que la de referencia (BAS), similar al tratamiento superficial hidrófobo (ACHI), y seguida por el hormigón con cenizas volantes (FA20). Las dos primeras opciones ofrecen una notable reducción de los costes de mantenimiento en comparación con la construcción, mientras que la tercera equilibra ambos aspectos.

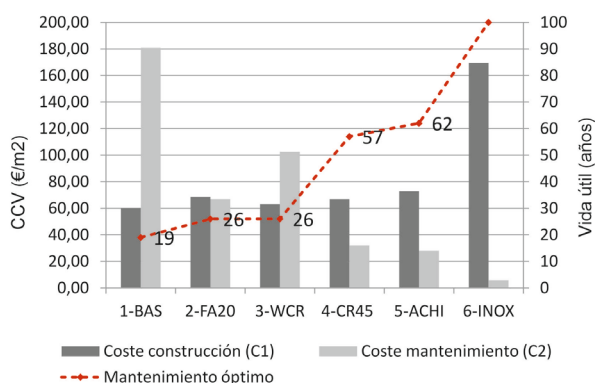


Figura 4. Resultados del CCV.

Los resultados indican que un enfoque reactivo es más eficaz para el mantenimiento de ACHI y CR45 que para FA20 y WRC. INOX tiene bajos costes de mantenimiento, ya que solo es necesario sustituir el recubrimiento en etapas iniciales de deterioro, aunque su alto coste de construcción limita su uso. El BAS, al no implementar ningún diseño preventivo, tiene el menor coste de construcción, pero implica los mayores gastos de mantenimiento

por la frecuencia con que son necesarias las reparaciones.

4.2 Evaluación medioambiental del ciclo de vida (ACV-A)

La Figura 5 muestra que los indicadores de punto final que más impacto ambiental causan están relacionados con la salud humana, y representan en torno al 40% del impacto total en todas las alternativas analizadas, salvo en INOX. En este caso, el agotamiento de recursos durante la fase de construcción representa el 60% del impacto total, que se dispara hasta 2,65 veces la media de las alternativas restantes.

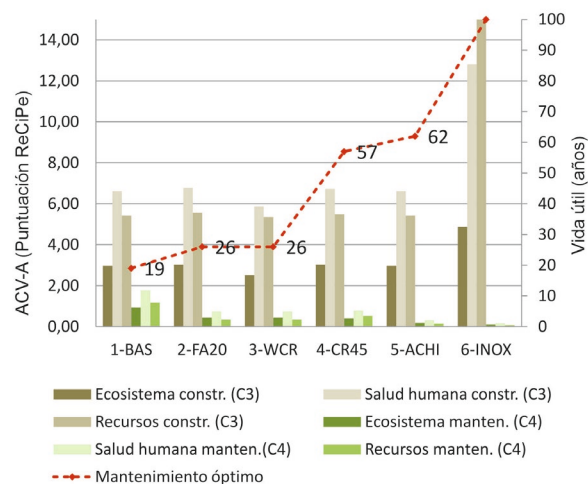


Figura 5. Resultados del ACV-A.

Un mayor nivel de durabilidad en el diseño no siempre implica un menor impacto ambiental. INOX es un caso extremo, pero CR45 o ACHI, con 57 y 62 años de ciclo de mantenimiento, respectivamente, presentan un 11% y un 2,5% más de impacto que WCR, que resulta ser la opción más efectiva desde una perspectiva estrictamente ambiental. Aunque esta solución tiene un impacto 2,38 veces mayor que ACHI durante la fase de mantenimiento, optimizar la relación agua/cemento en la construcción minimiza los impactos de producción al evitar el incremento de material, aditivos o el uso de protecciones

adicionales. Solo este diseño preventivo puede reducir los impactos ambientales totales hasta un 20% respecto a BAS, en comparación con enfoques reactivos centrados en el mantenimiento.

4.3 Evaluación de la sostenibilidad económico-ambiental (ACV-SOS)

Para evaluar la sostenibilidad de los diseños analizados, se solicitó la opinión de un grupo de expertos para establecer la importancia de cada criterio. Las ponderaciones de impacto se obtuvieron mediante el método FUCOM [17], en el que participaron tres expertos en la materia. La influencia de sus votos se determinó utilizando una función difusa simplificada, basada en el trabajo de Sánchez-Garrido et al. [16] a partir de la función neutrosófica. Las ponderaciones asignadas a los cuatro criterios agregados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Ponderación de criterios s/ grupo FUCOM

D ⁿ	Decisor 1		Decisor 2		Decisor 3		Pesos
	Peso	Φ	Peso	Φ	Peso	Φ	%
Coste	0,35	0,56	0,38	0,62	0,33	0,86	35,14
	0,29		0,25		0,26		26,48
Eco	0,22	0,56	0,22	0,62	0,22	0,86	22,13
	0,14		0,15		0,19		16,25

La Figura 6 muestra los resultados de sostenibilidad del ciclo de vida de cada alternativa estudiada desde una perspectiva bidimensional económica-ambiental. Se muestra el impacto (criterio) asociado a cada dimensión de evaluación (economía, C1 y C2, y medio ambiente, C3 y C4) en las etapas de construcción y mantenimiento. Para cada alternativa se ha obtenido el intervalo de mantenimiento que maximiza la puntuación de sostenibilidad resultante basándose en el procedimiento de optimización descrito en la Sección 3. La solución que ofrece mejores resultados en términos de sostenibilidad es la que se basa en el tratamiento superficial mediante impregnación hidrófoba anticorrosión

(ACHI). Se trata de un diseño bastante equilibrado que funciona muy bien en términos de durabilidad, ya que obtiene el intervalo óptimo de mantenimiento más alto (62 años), aunque no ha obtenido la mejor puntuación en ninguna de las diferentes dimensiones unidimensionales anteriores. Por el contrario, la alternativa con el menor índice de sostenibilidad es la de referencia (BAS) con 0.461, siendo mejorado su rendimiento por el diseño ACHI hasta en un 93,3%.

La alternativa sin mantenimiento INOX solo mejora un 16% el índice de la solución de referencia, por lo que una menor inversión en mantenimiento no siempre implica una mayor sostenibilidad. La puntuación de CR45 como segundo en el ranking (la mejor económica) es un 7,3% inferior a la preferida. Y en el caso de WCR (la mejor medioambiental), su desempeño un 25,6% inferior al de la primera, y ni siquiera llega a ser tercera en la clasificación. En general, cada enfoque da lugar a intervalos de mantenimiento óptimos muy dispares. Las diferencias son menores o coinciden en las alternativas con durabilidad reducida, como BAS, FA20 y WCR. No se aprecia una relación directa entre los resultados de las evaluaciones individuales (CCV y ACV-A) y el enfoque bidimensional de sostenibilidad, sugiriendo que el diseño sostenible debe tener en cuenta todas sus dimensiones simultáneamente.

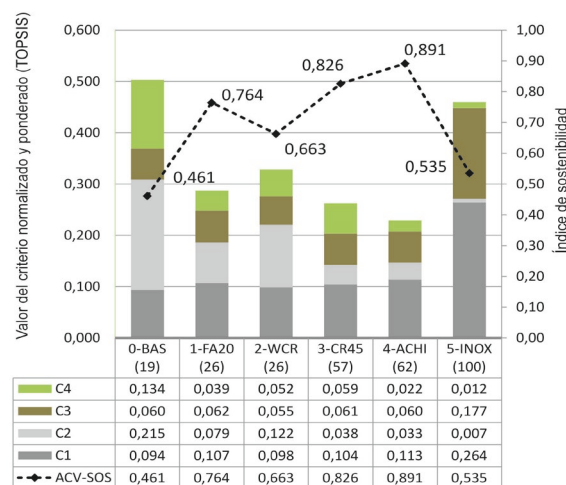


Figura 6. Resultados del Análisis “bidimensional” del Ciclo de Vida de la Sostenibilidad (ACV-SOS).

5. Conclusiones

Este artículo, siguiendo la norma ISO 14040, evalúa el ciclo de vida (ACV) de seis alternativas de mejora preventiva para una estructura de hormigón basada en MMC expuesta a cloruros en un entorno costero. Se analizan los impactos económicos y ambientales durante las etapas de construcción y mantenimiento, extendiendo la vida útil considerada a 100 años, más allá del periodo normativo.

Se destacan los desafíos en el diseño de estructuras de hormigón para entornos adversos, donde la elección de soluciones constructivas y estrategias de mantenimiento reactivo es crucial para garantizar la durabilidad y el rendimiento. El artículo propone un enfoque holístico que combina las técnicas multicriterio TOPSIS-FUCOM para evaluar el rendimiento de sostenibilidad de cada alternativa. Este enfoque compara los resultados tradicionales, considerando solo aspectos económicos o ambientales, con un modelo bidimensional que integra ambas dimensiones.

Los resultados indican que un enfoque unidimensional en los ACV puede omitir aspectos clave y generar decisiones de diseño ineficaces. Es fundamental considerar la relación entre la selección de materiales y las estrategias de reparación, más allá de los costes iniciales o el impacto ambiental inmediato. En muchos casos, una inversión inicial mayor reduce el mantenimiento y prolonga la vida útil, disminuyendo así los costes totales y la huella medioambiental final. En la sostenibilidad, los criterios pueden ser contradictorios. Un material con baja huella de carbono inicial puede ser menos duradero y generar más costes y residuos a largo plazo. Pero una opción más económica al inicio puede requerir más recursos con el tiempo. Un enfoque integral permite evaluar estos impactos en conjunto, logrando un equilibrio las dimensiones evaluadas.

Aunque combinar criterios económicos y ambientales equilibra la toma de decisiones, su aplicación depende de cada estudio del caso. Las limitaciones del artículo radican en la discrecionalidad de los límites de daño asumidos, ya que dependen de criterios subjetivos. Como consecuencia, un cambio en las hipótesis iniciales podría modificar los resultados, afectando la validez de las conclusiones y su aplicabilidad en diferentes contextos. Futuras investigaciones podrían incorporar aspectos sociales y ampliar el análisis a estructuras convencionales, como losas macizas y forjados reticulares, para compararlas con las ventajas de los MMC estudiados. Esto permitiría evaluar cómo la elección de materiales y las estrategias de reparación afectan a su ciclo de vida y a la sostenibilidad desde un punto de vista tridimensional.

Agradecimientos

Subvención PID2020-117056RB-I00 y PID2023-150003OB-I00 financiadas por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por «ERDF A way of making Europe».

Los autores extienden su agradecimiento a UNIDOME Deutschland GmbH y David Saiz Ruiz, Director General en Unidome Spain, S.L.

Referencias

- [1] McKinsey & Company. Global Energy Perspective 2023. https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/11/McKinsey-Sustainability-%E2%80%93Global-Energy-Perspective-2023_11.pdf
- [2] Asamblea General de las Naciones Unidas. Resolución Adoptada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- [3] D.M. Frangopol, Y. Dong, S. Sabatino. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making, Structure and Infrastructure Engineering 13(10) (2017) 1239-1257.

- [4] A. Ait-Ali, K. Odolinski, B. Pålsson, P. Torstensson. Evaluating the Mix of Maintenance Activities on Railway Crossings with Respect to Life-Cycle Costs, *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 24(1) (2024) 1–29.
- [5] J.J. Pons, V. Penadés-Plà, V. Yepes, J.V. Martí. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison, *Journal of Cleaner Production* 192 (2018) 411–420.
- [6] L. Yepes-Bellver, A. Brun-Izquierdo, J. Alcalá, V. Yepes. Artificial neural network and Kriging surrogate model for embodied energy optimization of prestressed slab bridges, *Sustainability* 16(19) (2024) 8450.
- [7] J. Choi. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement, *Journal of Cleaner Production* 209 (2019) 88–100.
- [8] I.J. Navarro, V. Yepes, J.V. Martí, F. González-Vidosa. Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks, *Journal of Cleaner Production* 196 (2018) 698–713.
- [9] M. Hadizadeh-Bazaz, I.J. Navarro, V. Yepes. Life Cycle Assessment of a Coastal Concrete Bridge Aided by Non-Destructive Damage Detection Methods, *Journal of Marine Science and Engineering* 11(9) (2023) 1656.
- [10] A.J. Sánchez-Garrido, I.J. Navarro, J. García, V. Yepes. A systematic literature review on Modern Methods of Construction in building: an integrated approach using machine learning, *Journal of Building Engineering* 73 (2023) 106725.
- [11] D. Bru, A. González, F.J. Baeza, S. Ivorra, Seismic behavior of 1960's RC buildings exposed to marine environment, *Engineering Failure Analysis* 90 (2018) 324–340.
- [12] I.J. Navarro, V. Yepes, J.V. Martí. Sustainability assessment of concrete bridge deck designs in coastal environments using neutrosophic criteria weights, *Structure and Infrastructure Engineering* 16(7) (2020) 949–967.
- [13] C. Albrecht, A. Albert, K. Pfeffer, J. Schnell. Design and construction of two-way spanning reinforced concrete slabs with flattened rotationally symmetrical void formers, *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (9) (2012) 590–600.
- [14] A. Allacker, A. Environmental and economic optimisation of the floor on grade in residential buildings, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17(6) (2012) 813–827.
- [15] M.A.J. Huijbregts, Z.J.N. Steinmann, P.M.F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander, R. Van Zelm, ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, *International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (2017) 138–147.
- [16] A.J. Sánchez-Garrido, I.J. Navarro, V. Yepes. Sustainable preventive maintenance of MMC-based concrete building structures in a harsh environment, *Journal of Building Engineering* 95 (2024) 110155.
- [17] D. Pamučar, Ž. Stević, S. Sremac. A new model for determining weight coefficients of criteria in mcdm models: Full consistency method (fucom), *Symmetry* 10(9) (2018) 393.
- [18] C.L. Hwang, K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag, 1981
- [19] CYPE Ingenieros, 2025. Generador de precios de la construcción. España. Disponible on line: <https://generadordeprecios.info/>
- [20] Ecoinvent 3.2 database. ecoinvent Association; 2015. <https://www.ecoinvent.org>
- [21] J. Martínez-Blanco, A. Lehmann, P. Muñoz, A. Anton, M. Traverso, J. Rieradevall, M. Finkbeiner. Application challenges for the social life cycle assessment of fertilizers within life cycle sustainability assessment, *Journal of Cleaner Production* 69 (2014) 34–48
- [22] Fib Bulletin 34, Model Code for Service Life Design, Fib, Lausanne, 2006.
- [23] Ministerio de transportes y movilidad sostenible, España, Código Estructural. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/06/29/470/dof/spa/pdf>.