

SOSTENIBILIDAD INTEGRAL EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS

Ignacio J. Navarro^{a*}, Carlos Montaner Dobón^b, Álvaro del Cuvillo Martínez-Ridruejo^c, Cristina López Sánchez^d, José María Lorenzo Romero^e

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA Valencia. Departamento de Estructuras. ORCID: 0000-0002-6539-1626.
ijnavarro@typsa.es. Autor de correspondencia.

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA Valencia. Jefe de Departamento de Estructuras. cmontaner@typsa.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA Madrid. Jefe de Proyecto Departamento de Estructuras. adelcuvillo@typsa.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA Valencia. Departamento de Estructuras. crlopez@typsa.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA Madrid. Director Adjunto Departamento de Estructuras. jmlorenzo@typsa.es

RESUMEN

En este estudio se analiza la relevancia de las emisiones a lo largo del ciclo de vida completo de un paso superior. El análisis toma como caso de estudio un paso superior biapoyado de un solo vano en el Puerto de Zierbena (Vizcaya, España). Se comparan diseños alternativos para la estructura, analizando sistemas estructurales en hormigón y metálicos, y considerando la huella de carbono asociada al ciclo de vida completo de la estructura. Este enfoque integral proporciona una comprensión más completa de las implicaciones ambientales debidas a las decisiones de diseño estructural con un enfoque más holístico, contribuyendo así a la búsqueda de soluciones más sostenibles en el campo de la ingeniería civil.

ABSTRACT

This study evaluates the relevance of emissions over the complete life cycle of an overpass. The analysis takes as a case study a single-span biaxially supported overpass in the Port of Zierbena (Vizcaya, Spain). Alternative designs for the structure are compared, analysing concrete and steel structural solutions, and considering the carbon footprint associated with the complete life cycle of the structure. This integrated approach provides a more complete understanding of the environmental implications due to structural design decisions with a more holistic approach, thus contributing to the search for more sustainable solutions in the field of civil engineering.

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad, Análisis del Ciclo de Vida, emisiones, paso superior, hormigón, huella de carbono, mantenimiento, acero.

KEYWORDS: Sustainability, Life Cycle Assessment, emissions, overpass, concrete, carbon footprint, maintenance, steel.

1. Introducción

Ha sido a lo largo de esta última década cuando el concepto de sostenibilidad, si bien se

definió hace casi 40 años, ha empezado a reformular el enfoque tradicional de la ingeniería civil. El sector de la construcción es uno de los mayores responsables del cambio climático, debido a su considerable aporte a las emisiones de gases de efecto invernadero y a su elevado

consumo de recursos naturales. Según el informe 2022 de la Agencia Internacional de Energía [1], se estima que el 11% de las emisiones globales de CO₂ a nivel global son ya consecuencia directa de la producción de materiales básicos en la construcción, como el cemento y el acero.

Por este motivo, iniciativas como el Pacto Verde Europeo, o los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que aspiran a lograr la neutralidad climática en 2050, pretendiendo para ello reducir los niveles de emisión actuales entorno al 50% en 2030, están poniendo contra las cuerdas al sector.

Ante este ambicioso objetivo, muchos países se han visto forzados a tomar medidas urgentes en el campo de las infraestructuras, como la recientemente aprobada Orden Circular OC 3/2024, que ya hace obligatorio el cálculo de la huella de carbono en proyectos de construcción y rehabilitación de firmes de cierta entidad. También el sector privado ha puesto su interés en el desarrollo de infraestructuras más sostenibles, procurando cada vez con mayor frecuencia la certificación de proyectos en sistemas de evaluación internacionales como ENVISION, LEED, u otros.

Ante esta creciente demanda de proyectos de construcción con bajas emisiones, tanto en el sector público como en el privado, la comunidad científica se ha volcado durante los últimos años en el estudio de cómo reducir la huella de carbono de infraestructuras de todo tipo, como puentes [2, 3], muros de contención [4], o infraestructuras ferroviarias [5-7], entre otros, poniéndose especial énfasis en la sostenibilidad de los materiales de construcción empleados [8-10].

En particular, se está prestando mucha atención en la repercusión del mantenimiento en las emisiones totales de las infraestructuras y edificios [11, 12]. Una de las conclusiones más frecuentes en aquellos estudios que contemplan la totalidad del ciclo de vida de las estructuras indica que las emisiones generadas por su mantenimiento pueden ser tanto más

significativas cuanto menos atención se haya prestado durante el diseño a la durabilidad de la solución planteada. En particular, muchos estudios indican que un mal diseño en estos términos puede resultar en emisiones a lo largo de la fase de servicio muy significativas [13] pudiendo llegar a igualar o incluso a superar las emisiones debidas a las fases de producción de materiales y construcción [14].

En este estudio se analiza la relevancia de la elección de materiales en las emisiones a lo largo del ciclo de vida completo de un paso superior, evaluando la huella de carbono asociada no sólo hasta la ejecución de la estructura, sino también a lo largo de su fase de mantenimiento. El análisis toma como referencia un paso superior existente, y se evalúan diseños alternativos para dicha estructura, analizando sistemas estructurales en hormigón y metálicos, y considerando la huella de carbono asociada al ciclo de vida completo de la estructura.

2. Caso de estudio

2.1. Diseño de referencia

Este estudio toma como caso de partida el tablero de uno de los dos puentes de hormigón existentes en el Puerto de Zierbena (Vizcaya), ejecutados a mediados de la década de los 90. Se trata de dos puentes de un solo vano, con una luz entre ejes de apoyos de unos 42 m (Figura 1).



Figura 1. Vista de uno de los puentes del Puerto de Zierbena.

El tablero tiene un ancho de 20.0 m en ambos casos, y está formado por diez vigas prefabricadas de hormigón pretensado de 1.75 m de canto (Figura 2), siendo la losa superior de 0.25 m de espesor.

Ante el visible estado de deterioro de las estructuras, la Autoridad Portuaria de Bilbao encargó en 2022 la inspección y evaluación del estado de dichos puentes a INTEMAC. Los daños identificados en las estructuras incluyen la oxidación de las armaduras en las caras inferiores

de las vigas de borde, algunas vigas adyacentes, y zonas puntuales de losas y estribos. De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados, se sabe que el recubrimiento medio de la armadura pasiva en la losa del tablero puede tomarse como 22.5 mm, mientras que en las vigas este recubrimiento es incluso menor, cercano a 1cm en muchas posiciones. La armadura activa inferior en las vigas tiene un recubrimiento de 25 mm.

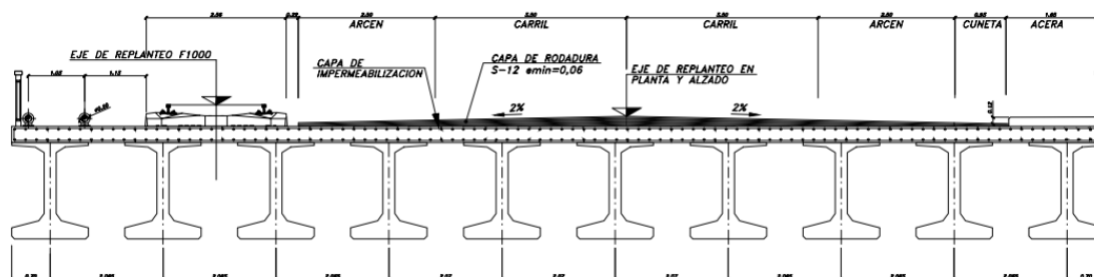


Figura 2. Sección transversal del tablero existente.

En las vigas, esta reducción del recubrimiento afecta principalmente a la armadura transversal, mientras que las armaduras activas presentan daños significativos solo en casos puntuales, como las vigas de borde expuestas a condiciones ambientales agresivas. Además, las losas presentan una penetración profunda de cloruros, alcanzando hasta 10 cm de profundidad, debido a la ausencia de impermeabilización en los tableros.

A pesar de estos daños, la calidad del hormigón es muy alta, con una resistencia característica a compresión de 63.4 N/mm² en vigas y 51.9 N/mm² en losas. Sin embargo, la vida útil residual en áreas sin daños visibles en las armaduras activas es corta, ya que se estima que podrían alcanzar una concentración crítica de cloruros en tan solo unos pocos años.

2.2. Diseños alternativos

Frente a este diseño deficiente en términos de durabilidad, se propone analizar siete diseños alternativos con el fin de poder evaluar su huella

de carbono en función de sus emisiones en fase de construcción y a lo largo de la fase de servicio.

En primer lugar, se proponen tres diseños en hormigón, basados en la misma geometría. El primero de ellos, consiste en un diseño con materiales convencionales, procurando cumplir estrictamente los requerimientos del Código Estructural [15] en términos de durabilidad (alternativa “HORM”). A continuación, se plantea una segunda alternativa en la que se hacen pequeñas modificaciones al diseño “normativo” anterior para lograr una mejor respuesta frente a la exposición a los cloruros, reduciendo la relación agua/cemento del hormigón de las vigas prefabricadas y de la losa del tablero (alternativa “HORM-A/C”). Como tercera alternativa de diseño, se propone una solución en la que se emplea cemento con bajo contenido de clinker para el hormigón de la losa (alternativa “HORM-CEM”).

Además de las anteriores alternativas de hormigón, se plantean cuatro diseños adicionales basados en una solución de tablero mixto, con tres cajones metálicos y losa de hormigón. En las cuatro alternativas, se considera que la losa de

hormigón es la misma que la que se ha planteado para la alternativa “HORM”. En cuanto a la solución de los cajones, para la primera alternativa se considera una solución metálica convencional, con pintura anticorrosión en la superficie exterior expuesta a cloruros, y con un espesor de sacrificio de acero para la superficie interior de los cajones (alternativa “MIXTO”). El segundo diseño consiste en cajones de acero galvanizado en caliente (alternativa “MIX-GALV.”). En tercer lugar, se contempla una alternativa con acero convencional reciclado al 90% (alternativa “MIXTO-R”). Por último, se considera una alternativa de acero galvanizado con un acero de base también reciclado al 90% (alternativa “MIX-GALV.-R”).

3. Materiales y métodos

3.1. Objeto y alcance

El objeto de este estudio es el análisis de ciclo de vida del diseño del tablero existente descrito anteriormente, así como de los siete diseños alternativos planteados. En concreto, se evalúa la huella de carbono de estos ocho diseños, considerando las fases de producción de materiales, construcción y mantenimiento (módulos A1 a A5, y B2 a B4 de acuerdo con la norma UNE EN 17472:2022).

La unidad funcional de este estudio comparativo es la totalidad del tablero descrito en el apartado anterior, en pleno funcionamiento a lo largo de una vida útil de 100 años, tal y como prescribe el Código Estructural para infraestructuras de este tipo. El estudio incluye, por lo tanto, la cuantificación de las operaciones de mantenimiento requeridas por cada una de las alternativas a analizar. De acuerdo con la norma ISO 14040, y dado el carácter comparativo del análisis, no se tienen en cuenta los materiales u operaciones de construcción o mantenimiento que sean idénticos entre las alternativas.

3.2. Estimación de mantenimiento

El tratamiento de la durabilidad en ambiente marino depende de si se evalúa un elemento de hormigón o metálico. Respecto a los elementos de hormigón, la vida útil se calcula teniendo en cuenta el proceso de ingreso de los iones cloruro hasta las armaduras. El avance de los cloruros a través del recubrimiento de hormigón responde a un proceso de difusión, y puede calcularse mediante la segunda Ley de Fick, tal y como se propone en el Anejo 12 del Código Estructural:

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

Donde C_{th} es el contenido límite de iones cloruro que desencadena la corrosión de las armaduras, C_b es el contenido de cloruros aportados por los materiales empleados en la fabricación del hormigón, C_s es el contenido superficial de cloruros, c es el recubrimiento de las armaduras, t es el tiempo en el cual se realiza el cálculo, y $D_{app,c}(t)$ el coeficiente de difusión aparente de cloruros, que depende de la relación agua/cemento y del tipo de cemento empleado.

De acuerdo con el Código Estructural, el contenido límite de cloruros C_{th} es, para una clase de exposición XS3, $C_{th} = 0.6\%$ para las armaduras pasivas, y $C_{th} = 0.3\%$ para las activas, medido sobre el peso de cemento del hormigón. En cuanto al contenido de cloruros, se asume el máximo permitido por la normativa, es decir $C_b = 0.2\%$ respecto al peso de cemento. De acuerdo con la clase de exposición, se asume un contenido superficial de cloruros de 0.5% respecto al peso de hormigón. A partir de estos valores, la vida útil de las estructuras se puede estimar en función del recubrimiento, la relación agua/cemento y el tipo de cemento empleado. Asumiendo como estrategia de mantenimiento que no se permitirá que se supere el contenido límite de cloruros en las armaduras en ningún momento, la estrategia de mantenimiento para

cada diseño alternativo de hormigón se da en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de la durabilidad para los distintos elementos de cada alternativa, y propuesta de mantenimiento.

Alternativa		Recubrimiento	Relación		Tiempo de	
		[mm]	a/c	D _{app,c} (t ₀)	iniciación ⁽²⁾	Propuesta de mantenimiento
			[-]	[10 ⁻¹² m ² /s]	[años]	
REF ⁽¹⁾	Vigas	Arm. Pasiva - 10	0.45	1.9	Arm. Pasiva - 5	1 viga cada 30 años
		Arm. Activa - 25			Arm. Activa - 20	Protección superficial cada 10 años
	Losa	Arm. Pasiva - 22	-	6.9	Arm. Pasiva - 5	5 cm cada 10 años
HORM	Vigas	Arm. Pasiva -50	0.45	5.91	Arm. Activa - 80	1 viga cada 80 años
		Arm. Activa - 65				Protección superficial cada 26 años
	Losa	Arm. Pasiva - 35	0.45	5.91	Arm. Pasiva -25	3.5 cm cada 27 años
HORM- CEM	Vigas	Arm. Pasiva - 50	0.4	4.80	-	Protección superficial cada 30 años
		Arm. Activa - 65				
	Losa	Arm. Pasiva - 35	0.45	1.90	-	
HORM-A/C	Vigas	Arm. Pasiva - 50	0.4	4.80	-	Protección superficial cada 30 años
		Arm. Activa - 65				
	Losa	Arm. Pasiva - 35	0.5	4.80	Arm. Pasiva - 40	3.5 cm cada 40 años
MIXTO ⁽³⁾	Losa	Arm. Pasiva - 35	0.45	5.91	Arm. Pasiva - 25	3.5 cm cada 27 años

Notas:

⁽¹⁾ En el caso del diseño existente, los valores del coeficiente de difusión $D_{app,c}(t_0)$ han sido obtenidos experimentalmente.

⁽²⁾ Si no figuran datos es porque el tiempo de iniciación de la corrosión es superior a la vida útil de diseño del elemento.

⁽³⁾ Los cajones de acero se repintarán con pintura anticorrosión cada 15 años. En el caso de acero galvanizado, cada 30 años.

En cuanto a los requerimientos para los elementos metálicos, y asumiendo una categoría de corrosividad C4, se ha fijado un espesor de sacrificio de acero en los paramentos no visitables de 1.5 mm por cada 30 años de exposición. En los paramentos visibles, se propone un tratamiento mediante pintura anticorrosión con un repintado periódico cada 15 años. Para las alternativas con acero galvanizado, el mantenimiento consiste en un repintado periódico cada 30 años con pintura

anticorrosión rica en zinc de 60 micras de espesor.

3.3. Inventario y evaluación de los impactos

Para la correcta evaluación del impacto ambiental de cada alternativa, es necesario cuantificar el consumo de material requerido por cada diseño a lo largo de su ciclo de vida. Los materiales considerados y su cantidad se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Consumo de material asociado a la construcción y mantenimiento de cada diseño alternativo analizado.

Alternativa	Fases A1-A5	Cantidad	Fases B2-B4	Cantidad
REF	Vigas	<i>Hormigón - CEM I. 42.5 MPa</i>	<i>Hormigón - CEM I. 42.5 MPa</i>	112.4 m ³
		<i>Acero pasivo - B500</i>	<i>Acero pasivo - B500</i>	5431.4 kg
		<i>Acero activo - Y1870</i>	<i>Acero activo - Y1870</i>	11962.0 kg
			<i>Protección superficial</i>	19966.5 m ²
	Losa	<i>Hormigón - CEM I. 25 MPa</i>	<i>Hormigón - CEM I. 25 MPa</i>	427.0 m ³
HORM		<i>Acero pasivo - B500</i>		
	Vigas	<i>Hormigón - CEM II/A-D. 42.5 MPa</i>	<i>Hormigón - CEM II/A-D. 42.5 MPa</i>	42.1 m ³
		<i>Acero pasivo - B500</i>	<i>Acero pasivo - B500</i>	5431.4 kg
		<i>Acero activo - Y1870</i>	<i>Acero activo - Y1870</i>	11962.0 kg
			<i>Protección superficial</i>	10970.6 m ²

HORM-CEM	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa.	110.7 m ³
	Vigas	Hormigón - CEM II/A-D. 42.5 MPa Acero pasivo - B500 Acero activo - Y1870	337.3 m ³ 16294.3 kg 35886.1 kg	Protección superficial	9507.8 m ²
	Losa	Hormigón - CEM III/B. 35 MPa Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg		
HORM-A/C	Vigas	Hormigón - CEM II/A-D. 42.5 MPa Acero pasivo - B500 Acero activo - Y1870	337.3 m ³ 16294.3 kg 35886.1 kg	Protección superficial	9507.8 m ³
	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. a/c=0.40 Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. a/c=0.40	74.7 m ³
MIXTO	Cajones	Acero estructural - S355-0% recicl. Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	140781.9 kg 804.4 m ²	Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	5363.1 m ²
	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa.	110.7 m ³
MIX-GALV.	Cajones	Acero estructural - S355-40% recicl. Zinc (85µm)	100558.5 kg 1694.7 m ²	Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	2681.5 m ²
	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa.	110.7 m ³
MIXTO-R	Cajones	Acero estructural - S355-90% recicl. Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	140781.9 kg 804.4 m ²	Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	5363.1 m ²
	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa.	110.7 m ³
MIX-GALV.-R	Cajones	Acero estructural - S355-90% recicl. Zinc (85µm)	100558.5 kg 1694.7 m ²	Pintura anticorrosión - Espesor 60 micras	2681.5 m ²
	Losa	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa. Acero pasivo - B500	256.2 m ³ 32387.6 kg	Hormigón - CEM II/A-D. 35 MPa.	110.7 m ³

Para la evaluación de la huella de carbono de las distintas alternativas descritas anteriormente se ha hecho uso del programa comercial OneClick LCA®. Este programa, a través de una base de datos que contiene información de Declaraciones Ambientales de Producto, así como de bases ambientales reconocidas como Ecoinvent, permite calcular las emisiones de CO₂ equivalentes mediante el indicador de impacto llamado potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés). De acuerdo con la norma EN 15804: A2, este indicador contabiliza el GWP de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero a cualquier medio originado por la oxidación o reducción de combustibles fósiles o materiales que contienen carbono fósil mediante su transformación o degradación (por ejemplo, combustión, incineración, vertido, etc.). La caracterización de este impacto se lleva a cabo empleando el modelo base de 100 años del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre

el Cambio Climático), basado su informe sobre Cambio Climático de 2013 [16]. La Tabla 3 muestra el GWP unitario de los principales materiales involucrados en cada una de las alternativas analizadas.

Tabla 3. Emisiones unitarias asociadas a cada material.

Material	kgCO ₂ eq.	Fuente
1 m ³ Horm. CEM I. 42.5 MPa	402	O.C. ⁽¹⁾
1 m ³ Horm. CEM I. 25 MPa	274.71	O.C.
1 m ³ Horm. CEM II/A-D. 35 MPa.	298.19	O.C.
1 m ³ Horm. CEM II/A-D. 42.5 MPa	367	O.C.
1 m ³ Horm. CEM III/B. 35 MPa	139.5	O.C.
1 m ² Protección superficial	2.57	DAP
1 kg Acero pasivo B500	1.41	O.C.
1 kg Acero activo Y1870	1.82	O.C.
1 kg S355 - 0% contenido reciclado	3.21	O.C.
1 kg S355 - 40% contenido reciclado	2.3	O.C.
1 kg S355 - 90% contenido reciclado	0.74	O.C.
1 m ² Galvanizado 85 micras	3.6	DAP
1 m ² Pintura anticorrosión 60 micras	1.25	DAP

Notas:

⁽¹⁾ O.C. indica que el dato se ha obtenido de la base de datos de Oneclick LCA®

En el cálculo de las emisiones unitarias por material, se han asumido distancias de transporte de la fábrica al lugar de la obra representativas de la media en España. En concreto, se asume una distancia de transporte de 60 km para el hormigón, 370 km para los productos de acero (armaduras y acero estructural), y 150 km para las pinturas y tratamientos superficiales. En todos los casos, se ha asumido que el transporte se lleva a cabo por carretera.

4. Resultados y discusión

La Figura 3 muestra la huella de carbono total para cada uno de los 8 diseños alternativos, incluido el diseño existente. Se puede observar que el diseño existente para el tablero estudiado genera, unas emisiones de 583 tCO₂eq. Estas emisiones son asociadas a las hipótesis de cálculo y a los límites del sistema de producto antes descrito.

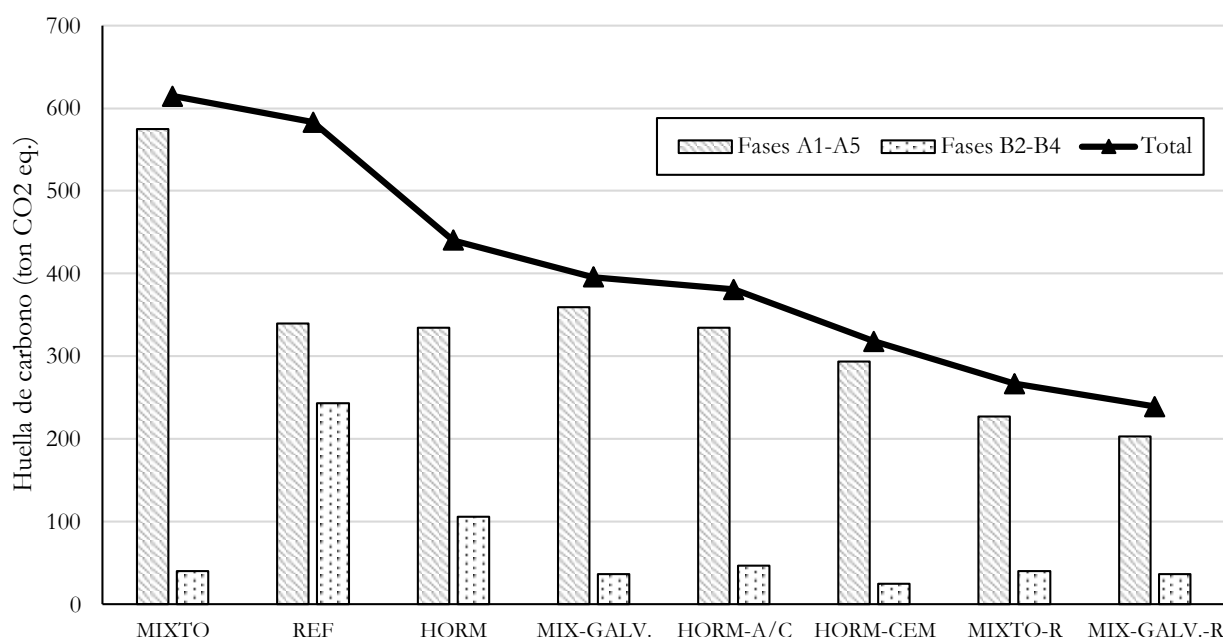


Figura 3. Huella de carbono total y asociada a cada fase de las distintas alternativas analizadas.

Cabe destacar que la solución convencional basada en un sistema mixto de tablero generaría una huella de carbono un 5% superior a la del diseño existente. Esto se debe a que la producción del acero lleva asociadas unas emisiones unitarias por kg de producto muy superiores a las del hormigón. Como orden de magnitud, la producción de una tonelada de acero sin reciclar genera 3.21 kgCO₂eq, mientras que la producción de 1 kg de un hormigón convencional con cemento Portland genera 0.18 kgCO₂eq.

Estos datos podrían llevar a la errónea conclusión de que las soluciones con acero estructural no son competitivas en términos de huella de carbono frente a las soluciones de hormigón. Sin embargo, estas soluciones tienen

mucho más margen de optimización de sus emisiones frente a las anteriores. Tal y como se puede apreciar en la Figura 3, las soluciones con menor impacto son aquellas que basan su sistema en un tablero mixto con acero estructural reciclado en alta proporción (en este estudio se ha supuesto un contenido de acero reciclado del 90%). En estos casos, se consigue reducir de la huella de carbono a un 45% respecto al resultado obtenido para el diseño de referencia.

Respecto a las soluciones basadas en hormigón, se observa que una solución con materiales convencionales cumpliendo estrictamente los requerimientos del Código Estructural consigue una reducción del 25% de la huella de carbono respecto al diseño de

referencia. Esto se debe fundamentalmente a las mejores prestaciones en términos de durabilidad que prescribe la norma, así como en el tipo de cemento empleado. Por otra parte, el empleo de cementos con bajo contenido de clinker (en este caso se ha empleado un CEM III/B para la losa), arroja resultados casi tan competitivos como el empleo de acero reciclado comentado previamente. En este caso, la alternativa “HORM-CEM” alcanza una huella de carbono que es prácticamente la mitad de las emisiones del diseño de partida.

La Figura 3 muestra, además, la contribución de las fases de construcción y mantenimiento a las emisiones totales de cada solución. Se observa que, en los diseños basados en el uso de hormigón, la huella de carbono de la fase de mantenimiento puede llegar prácticamente a igualar las emisiones de la fase de construcción. Esto es lo que se aprecia en el caso del diseño existente (alternativa “REF”), diseño que hoy sería inaceptable desde el punto de vista de la durabilidad. En un diseño que cumple estrictamente los requerimientos del Código Estructural, el impacto de la fase de mantenimiento baja rápidamente a un 30% del impacto de la fase de construcción.

Cabe destacar que el empleo de cementos tipo CEM III/B o el uso de relaciones

agua/cemento bajas para elementos expuestos a ambientes marinos resultan en hormigones con coeficientes de difusión significativamente inferiores a los hormigones convencionales, ofreciendo soluciones con una demanda de mantenimiento y, por lo tanto, con una huella de carbono en la fase de servicio bastante menor.

El impacto de la fase de mantenimiento en el caso de soluciones basadas en sistemas mixtos es significativamente bajo, entre el 5 y 15% del total. Además, una parte importante de estas emisiones se debe al mantenimiento de la losa y no de los cajones. El bajo impacto del mantenimiento de los elementos metálicos se debe a que, en estos casos, dicho mantenimiento no requiere la producción de acero u hormigón, sino exclusivamente de pinturas, y la repercusión de éstas sobre la huella total es mínima.

En la Figura 4 se muestra cuál es la contribución del tablero y las vigas/cajones a la huella de carbono total de cada una de las soluciones analizadas. Se observa que, en general, las emisiones asociadas a la ejecución y mantenimiento de las vigas (bien sean las vigas prefabricadas de las soluciones de hormigón o los cajones metálicos de las soluciones mixtas) superan el 60-65% de las emisiones totales. En el caso de la solución mixta convencional esta contribución alcanza incluso un 75%.

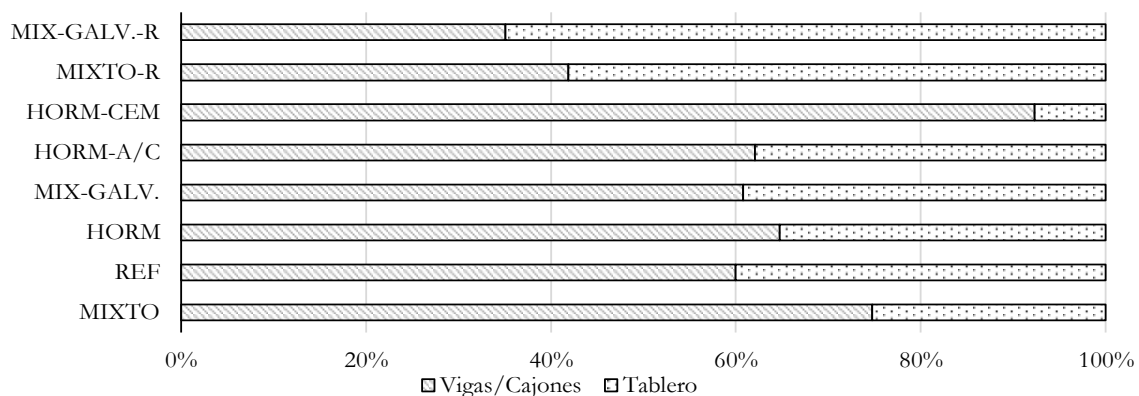


Figura 4. Contribución de la losa y de las vigas/cajones a la huella de carbono total del tablero para las distintas alternativas.

Esta contribución tan elevada de los cajones de acero acentúa por tanto el potencial de reducción de la huella de carbono al emplear

acero reciclado en altas proporciones. Este potencial de reducción de emisiones se ve reducido en el caso de que las vigas sean de

hormigón pretensado, dado que para elementos pretensados el Código Estructural no permite el uso de cementos tipo CEM III.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido identificar varios aspectos clave relacionados con la sostenibilidad y el impacto ambiental relacionadas con el diseño de estructuras expuestas a ambiente marino. En el caso de sistemas estructurales mixtos, destaca que incorporar altos porcentajes de acero reciclado presenta un enorme potencial para reducir significativamente el impacto ambiental, promoviendo una economía circular en la construcción. Asimismo, el empleo de cementos tipo CEM III/B en soluciones de hormigón se presenta como una alternativa altamente competitiva debido a su capacidad para disminuir las emisiones asociadas a la fabricación y el mantenimiento del hormigón.

Por otro lado, las vigas y cajones estructurales representan cerca del 65% de las emisiones totales, lo que subraya la importancia de optimizar estos elementos para mejorar la sostenibilidad general de las estructuras. En cuanto a la durabilidad, se observa que no considerarla en la fase de diseño puede duplicar la huella de carbono resultante, ya que el mantenimiento a lo largo de la vida útil de la estructura genera emisiones comparables a las de la fase de construcción. Sin embargo, el uso de cementos tipo CEM III y relaciones agua/cemento bajas permite mejorar significativamente la durabilidad, lo que a su vez reduce las necesidades de mantenimiento y contribuye a una mayor sostenibilidad.

En el caso de los sistemas mixtos, el impacto del mantenimiento, basado fundamentalmente en el empleo de pinturas anticorrosión, resulta menos relevante en comparación con el impacto de la fase de construcción. En conjunto, los resultados obtenidos en este análisis comparativo subrayan

la importancia de adoptar un enfoque integral en el diseño estructural, donde la selección de materiales, la consideración de la durabilidad y el análisis del ciclo de vida desempeñan un papel fundamental en la reducción del impacto ambiental y el avance hacia soluciones constructivas más sostenibles.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a INTEMAC, y en particular a Raúl Rubén Rodríguez, Eduardo Díaz-Pavón, Gonzalo Jiménez y a Jesús María Rodríguez, por el excelente trabajo de inspección y evaluación llevado a cabo, cuyos resultados han servido de base para el presente estudio.

Referencias

- [1] International Energy Agency (1991). *World Energy Outlook*, Paris, OECD.
- [2] Zhou, Z. W., Alcalà, J. & Yepes, V. (2023) Carbon impact assessment of bridge construction based on resilience theory, *Journal of Civil Engineering and Management*. 29(6): 561–576.
- [3] Mara, V., Haghani, R. & Harrison, P. (2014) Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution, *Construction and Building Materials*. 50: 190-199.
- [4] Martínez-Muñoz, D., Martí, J. V., García, J. & Yepes, V. (2021) Embodied Energy Optimization of Buttressed Earth-Retaining Walls with Hybrid Simulated Annealing, *Applied Sciences*. 11(4): 1800.
- [5] Qi, Y., Indraratna, B., Ngo, T., Arachchige, C. M. K. & Hettiyahandi, S. (2024) Sustainable solutions for railway using recycled rubber, *Transportation Geotechnics*. 46: 101256.
- [6] Pons, J. J., Sanchis, I. V., Franco, R. I. & Yepes, V. (2020) Life cycle assessment of a railway tracks substructures: Comparison of ballast and ballastless rail tracks,

- Environmental Impact Assessment Review*. 85: 106444.
- [7] Navarro, I. J., Ramos, A., Lorenzo, J. M. & Sánchez, J. L. (2024) Sustainability as a key design factor from the structure conception stage. IABSE Symposium: Construction's Role for a World in Emergency, Manchester, United Kingdom, 10-14 April 2024, published in IABSE Symposium Manchester 2024, pp. 855-863.
- [8] Zhou, D., Wang, R., Tyrer, M., Wong, H. & Cheeseman, C. (2017) Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material, *Journal of Cleaner Production*. 168: 1180 – 1192.
- [9] Revilla-Cuesta, V., Chica Paez, J., de la Fuente Alonso, J., Briz Blanco, E., Hernández Bagages, J. & Ortega-López, V. (2020) Evaluación del comportamiento de un hormigón autocompactante con árido reciclado grueso y fino, *Hormigón y Acero*. Avance online
- [10] Josa i Culleré, I., de la Fuente Antequera, A., Pons Valladares, O. & Aguado de Cea, A. (2022) Evaluación de sostenibilidad de diferentes materiales para elementos estructurales de cubiertas, *Hormigón y Acero*. 73(297): 73-80.
- [11] Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., Martínez-Montes, G. & Rubio-Gómez, M. C. (2017) An alternative sustainable railway maintenance technique based on the use of rubber particles, *Journal of Cleaner Production*. 142(4): 3850-3858.
- [12] Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J. & Yepes, V. (2024) Sustainable preventive maintenance of MMC-based concrete building structures in a harsh environment, *Journal of Building Engineering*. 95: 110155.
- [13] Balogun, T. B., Tomor, A., Lamond, J., Gouda, H. & Booth, C. A. (2019) Sustainability of bridge maintenance, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering*. 172(1): 54-64.
- [14] Navarro, I. J., Martí, J. V. & Yepes, V. (2019) Reliability-based maintenance optimization of corrosion preventive designs under a life cycle perspective, *Environmental Impact Assessment Review*. 74: 23-34.
- [15] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021) *Código Estructural*. Orden PCI/1/2021, de 10 de agosto. Boletín Oficial del Estado, núm. 195, 11 de agosto de 2021, 92429–93074.
- [16] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.