

# Evaluación de la sostenibilidad de materiales para elementos estructurales de cubiertas

## *Sustainability Assessment of Different Materials for Roofs' Structural Elements*

Irene Josa i Culleré<sup>\*a</sup>, Albert de la Fuente Antequera<sup>b</sup>, Oriol Pons Valladares<sup>c</sup>, Antonio Aguado de Cea<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Investigadora. Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>b</sup> Dr. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Profesor agregado. Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>c</sup> Dr. Departamento de Tecnología de la Arquitectura. Profesor lector. Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>d</sup> Dr. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Profesor catedrático. Universitat Politècnica de Catalunya

Recibido el 31 de mayo de 2019; aceptado el 14 de diciembre de 2020

### RESUMEN

Hoy en día, es creciente la importancia que debe darse a la consideración de aspectos de sostenibilidad en el desarrollo de proyectos de infraestructuras. En concreto, la elección del material de construcción idóneo puede permitir mejorar notablemente la sostenibilidad de la estructura en términos tanto económicos, ambientales como sociales. Este artículo propone un modelo de evaluación de la sostenibilidad basado en la teoría multi-atributo para analizar diferentes alternativas de materiales para miembros estructurales. El modelo es utilizado para evaluar la sostenibilidad de distintas alternativas de cubiertas de polideportivos.

©2022 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad, madera estructural, cerchas metálicas, vigas de hormigón, MIVES, cubiertas.

### ABSTRACT

Nowadays, the importance to be given to sustainability issues in the development of infrastructures projects is increasing. Particularly, choosing an appropriate construction material might allow to substantially improve a structure's sustainability whether in economic, environmental or social terms. This article proposes an assessment model based on the multi-attribute theory for the analysis of different alternatives for structural members' materials. The model is used to assess the sustainability of different alternatives of sports' halls roofs.

©2022 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

KEYWORDS: Sustainability, structural timber, steel trusses, concrete girders, MIVES, roofs.

## 1. INTRODUCCIÓN

En un contexto a nivel mundial marcado por la necesidad de abogar por formas de vida más sostenibles, el sector de la construcción se erige como uno de los sectores con los mayores impactos negativos sobre el medio ambiente. Como señala Levin 1997, la construcción de edificios está vinculada a ocho de las principales categorías de estresores ambientales: uso de materias primas,

energía, agua y tierra, emisión de contaminación, efluentes de agua, desechos sólidos y otras emisiones.

Al analizar la sostenibilidad en los distintos ámbitos de la construcción, deben considerarse indicadores sociales, económicos y ambientales y, además, los mismos deben tenerse en cuenta durante todo el ciclo de vida de la estructura, desde su planificación hasta su desmantelamiento. Una barrera para la sostenibilidad en la construcción es el hecho de que la infraestructura sos-

\* Persona de contacto / Corresponding author:  
Correo-e / e-mail: [irene.josa@upc.edu](mailto:irene.josa@upc.edu) (Irene Josa i Culleré).

tenible generalmente está engañosamente vinculada a conceptos como edificios verdes o eficiencia energética en los edificios (Ding 2008, Haapio y Viitaniemi 2008, Moakher y Pimplikar 2012, Zuo y Shao 2014, Kim et al. 2018). Sin embargo, estos aspectos solo representan factores incluidos en el pilar ambiental de la sostenibilidad. Cuando se trata de diseñar infraestructuras sostenibles, los ingenieros necesitan, no solo incorporar información sobre los factores relacionados con los impactos ambientales, sino también los relacionados con los aspectos económicos y sociales.

Una característica clave de los edificios que pueden desempeñar un papel vital para minimizar el impacto de un edificio es el material utilizado (Govindan et al. 2016). Los esfuerzos actuales para garantizar una construcción sostenible han puesto un énfasis particular en el desarrollo de nuevas tecnologías y nuevos materiales como los materiales reutilizados (Sieffert et al. 2014). Desafortunadamente, debe enfatizarse que estos sistemas innovadores se usan con poca frecuencia en la práctica debido a los altos costos relacionados con las tecnologías de vanguardia o debido a la insuficiencia de estas tecnologías con respecto a las directrices y herramientas de evaluación de sostenibilidad existentes.

Ello hace necesario evaluar en qué medida la elección del material de elementos estructurales específicos contribuye a la sostenibilidad total de un edificio. Para ello, MIVES es una metodología que permite apoyar procesos de toma de decisiones multicriterio. Se trata de un método que ha demostrado ser eficiente y robusto para este propósito en varios campos como, por ejemplo, infraestructuras subterráneas (de la Fuente et al. 2017) e hidráulicas (Pardo y Aguado 2014, de la Fuente et al. 2016); componentes y sistemas de construcción (Pons y Aguado 2012, Pons y de la Fuente 2013, Pons et al. 2016, de la Fuente et al. 2019); construcción industrial (San- José Lombera y Garrucho Aprea 2010); desarrollo urbano (Pujadas et al. 2017); infraestructura de generación de electricidad (Cartelle et al., 2015) e, incluso, gestión de viviendas post-desastre (Hosseini et al., 2015, 2016). Además, vale la pena mencionar que la Asociación Española de Hormigón Estructural (Aguado et al. 2012) y la Comisión 6 (prefabricación) de fib (féderation international du béton), con el lanzamiento del boletín 88 de fib (fib 2018), incluyó el modelo MIVES como herramienta de referencia para abordar el análisis de sostenibilidad de componentes estructurales para edificios e infraestructuras (de la Fuente and Fernández-Ordóñez 2018).

Habiendo dicho esto, el objetivo de este trabajo de investigación es, por un lado, proponer un modelo basado en MIVES para evaluar la sostenibilidad de los componentes estructurales y, por el otro, usar este modelo para abordar la evaluación de sostenibilidad de diferentes alternativas (materiales y tipologías estructurales) de vigas y cerchas para la construcción de cubiertas de pabellones deportivos en España. Este tipo de instalaciones son estructuralmente representativas para otros tipos de usos de edificios de una sola planta (por ejemplo, con fines industriales, mercados o centros comerciales).

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: la [sección 2](#) presenta el caso de estudio que se analiza en este documento. A continuación, la [sección 3](#) presenta la metodología que se ha seguido para construir el marco de evaluación de sostenibilidad y describe el modelo propuesto. A continuación, en la [sección 4](#), se analizan y discuten los resultados del caso de estudio tanto desde un punto de vista determinista como probabilista. Finalmente, en la [sección 5](#) se recogen las principales conclusiones derivadas del resultado.

## 2.

### CASO DE ESTUDIO

Las alternativas escogidas para el caso de estudio se basan en un estudio inicial llevado a cabo sobre un total de 444 polideportivos localizados en Cataluña. Se recogió información sobre estos polideportivos y se clasificaron de acuerdo a su material y tipología estructural.

Finalmente, se escogieron siete alternativas distintas para el análisis de su sostenibilidad. Las alternativas consideradas son:

1. Cercha metálica llana (CML)
2. Cercha metálica peraltada (CMP)
3. Cerchadehormigónreforzado(CHR)
4. Viga aligerada de hormigón pretensado (VAHP)
5. Viga de hormigón pretensado (VHP)
6. Viga de madera (VM)
7. Cercha de madera (CM)

Las fases del ciclo de vida consideradas en el análisis son las siguientes: extracción del material y producción, producción de los elementos estructurales, transporte al emplazamiento de construcción, instalación del elemento estructural y mantenimiento básico durante el servicio del elemento. La vida útil del elemento ha sido considerada de 50 años.

## 3.

### METODOLOGÍA

#### 3.1. MIVES

MIVES (Método de Valor Integrado para Evaluaciones Sostenibles) es un método destinado a apoyar decisiones basadas en la teoría de la utilidad de múltiples atributos.

A través de este método, cada una de las alternativas de un problema específico se evalúa para obtener una resolución óptima, que se basa en el valor de un índice final. El valor de este índice se obtiene mediante la agregación de la evaluación de varios indicadores, criterios y requisitos diferentes que fueron elegidos previamente por las partes interesadas. En general, se supone que las preferencias del tomador de decisiones con respecto a los indicadores son conocidas o pueden estimarse. Además, MIVES estructura el problema en diferentes niveles. Cada nivel contiene los parámetros a estudiar y depende del caso estudiado. Los primeros niveles incluyen aspectos que son más generales y cualitativos, mientras que los últimos niveles incluyen los aspectos más específicos, que se denominan indicadores. En este proyecto, se utilizó un marco compuesto por tres niveles; Este marco se compone de requisitos, criterios e indicadores.

Entre estos tres factores, los indicadores son los únicos aspectos que se evalúan durante el proceso. La evaluación se lleva a cabo aplicando una función de valor a los indicadores; Las funciones de valor permiten transformar variables cualitativas o cuantitativas con escalas y unidades propias en un valor no dimensional comprendido entre 0 y 1, correspondiente a los grados de satisfacción mínimo y máximo, respectivamente.

Dicho esto, el proceso para implementar MIVES sigue los pasos que se indican a continuación. Primero, se debe construir

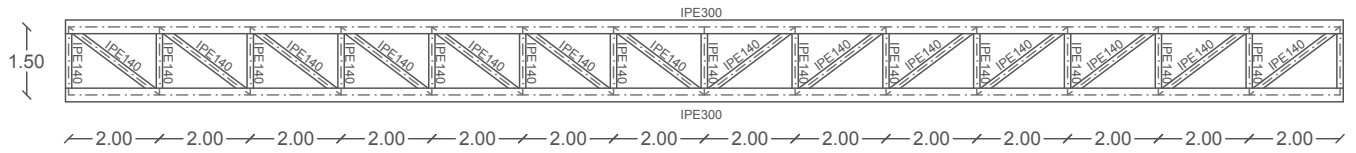
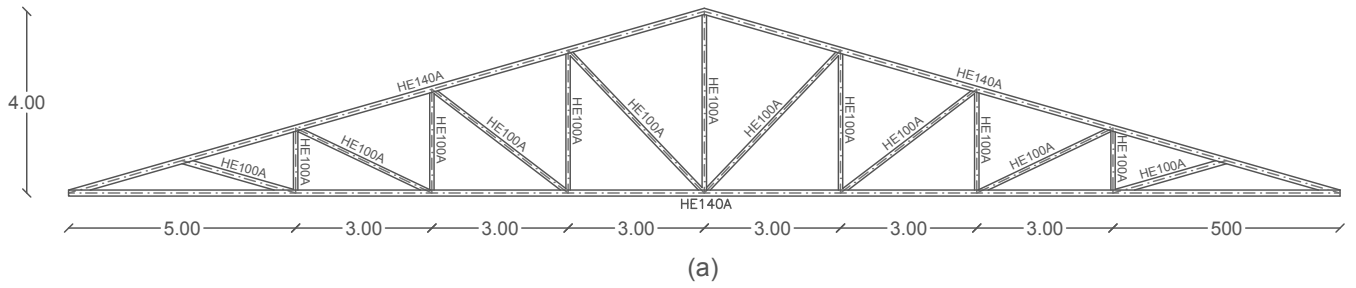


Figura 1. Detalles del diseño de (a) la cercha peraltada metálica y (b) la cercha llana metálica.

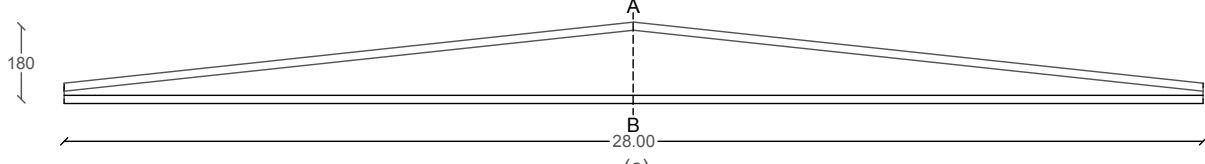
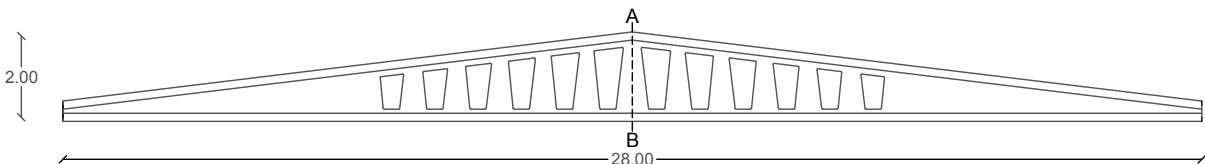
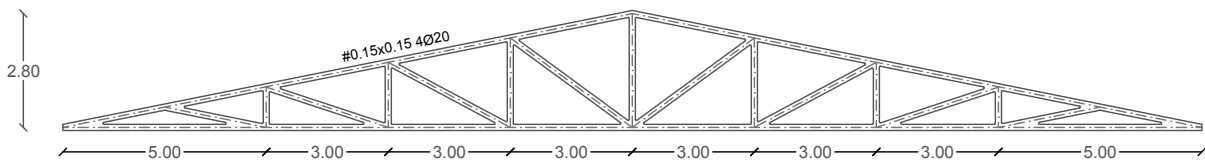


Figura 2. Detalles del diseño de (a) la cercha de hormigón reforzado, (b) la viga aligerada de hormigón pretensado y (c) la viga de hormigón pretensado.

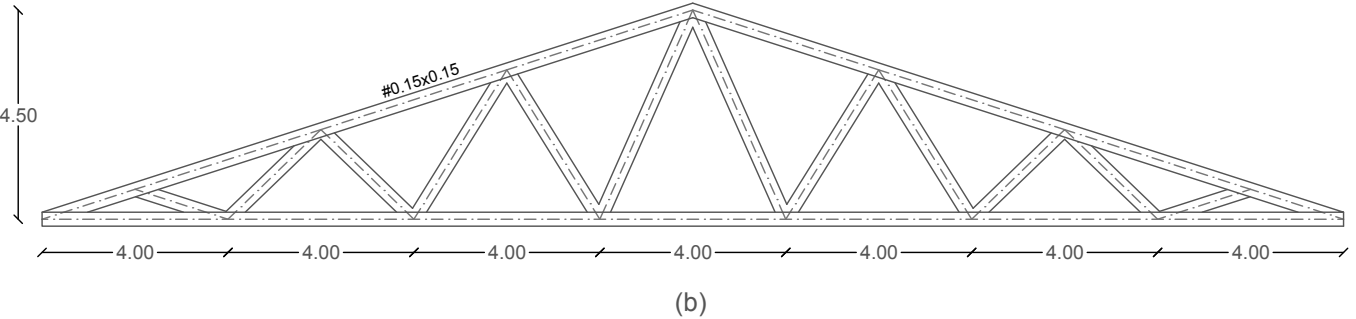
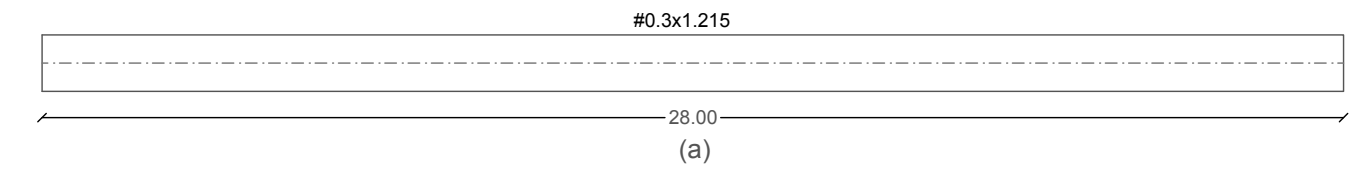


Figura 3. Detalles del diseño de (a) la viga de madera y (b) la cercha de madera.

el marco teórico en el que se basa el árbol de decisión y definir los indicadores correspondientes a cada uno de los últimos aspectos en el último nivel. Posteriormente, si hay una alternativa para la que faltan datos, la situación debe analizarse para decidir cómo tratar esta falta. Sin embargo, en el presente estudio este paso se ha omitido ya que se recopilaron datos para todos los indicadores. Luego, para poder agregar los indicadores es necesario que las variables estén normalizadas; para este propósito, las funciones de valor mencionadas anteriormente fueron calibradas y utilizadas. La ponderación y la agregación se producen después de obtener todos los indicadores en un rango entre 0 y 1. Una vez que se recopilan los valores para el índice de cada alternativa, es necesario examinar la solidez de los resultados. Para esto, se necesita un análisis de sensibilidad. Finalmente, los resultados se pueden contrastar para que se puedan identificar las mejores alternativas en términos de sostenibilidad.

### 3.2. Modelo de evaluación

Con el objetivo de evaluar la sostenibilidad de las diferentes alternativas, se establecieron tres requisitos: económico, ambiental y social, los cuales conforman los tres pilares de referencia sobre los que se sustenta la sostenibilidad. La definición de los criterios e indicadores para cada uno de los tres requisitos es de gran importancia tanto para la representatividad como para la fiabilidad de los resultados. Por lo tanto, la idoneidad del modelo de evaluación se garantizó mediante la realización de seminarios con expertos a lo largo de varias sesiones, así como mediante la búsqueda de publicaciones de casos de estudios académicos y técnicos en el mismo campo.

La figura 3 muestra el árbol de toma de decisiones con sus tres niveles correspondientes, así como con los pesos asignados a cada uno de los aspectos. En cuanto a los pesos, estos se asignaron en base a las pautas dadas en publicaciones hechas en el mismo campo y confirmados de acuerdo con los criterios de los expertos. Además, en la tabla 1 se pueden encontrar los parámetros constitutivos de las funciones de valor para cada uno de los indicadores.

#### 2.3.1. Requerimiento económico

El requisito económico está representado por dos criterios: costes de construcción (C1) y costes de mantenimiento (C2). El primero, C1, está compuesto por un indicador que incluye los costes directos (I1); a saber, los costos atribuibles al material, al transporte y a la instalación. Estos tres elementos se agregan para obtener el valor del indicador. El segundo criterio, mantenimiento (C2), cubre los costes relacionados con el mantenimiento de la infraestructura. No se han considerado reparaciones por acciones accidentales.

#### 2.3.2. Requerimiento ambiental

El requisito ambiental se compone de dos criterios: emisiones (C3) y consumo de recursos (C4).

El objetivo del criterio C3 es favorecer aquellas alternativas con un menor impacto en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, este criterio incluye un indicador, emisiones de CO<sub>2</sub> (I3), que es un gas de efecto invernadero y que, en consecuencia, contribuye al efecto invernadero al absorber y emitir radiación térmica. En el análisis del ciclo de vida, las etapas que se incluyeron fueron: (1) extracción de los materiales, (2) fabricación del elemento, (3) transporte al pabellón deportivo.

El propósito del criterio C4 es, por un lado, minimizar el consumo de recursos y, por otro lado, dar cuenta de la posibilidad de reutilización de diferentes materiales, tanto en la etapa de construcción como en la etapa de desmantelamiento. Para ello, se proponen tres indicadores: energía (I4), agua (I5) y recursos (I6).

La evaluación de los indicadores I4 e I5 es directa y considera las mismas etapas del ciclo de vida que el indicador I3.

En cuanto al indicador I6, su objetivo principal es considerar la cantidad de cada material que se utiliza y también las características inherentes. Por lo tanto, para su evaluación se definieron tres subindicadores diferentes: escasez de materias primas, potencial de reciclaje y potencial para el uso de materiales reciclados. Estas variables han sido adaptadas de Harris 1999 y Vefago y Avellaneda 2013 al presente proyecto.

- La escasez de las materias primas considera si los materiales utilizados para la producción de los elementos estruc-

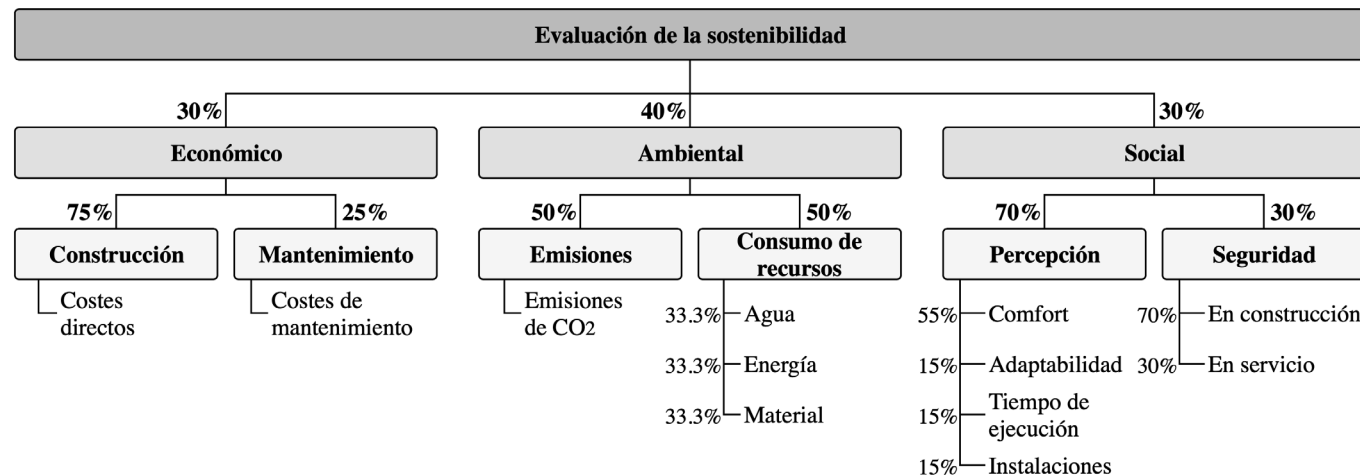


Figura 4. Árbol de decisión del índice de sostenibilidad del modelo.

TABLA 1.  
Características específicas de los parámetros del modelo MIVES

Indicador	Unidades	Función	Xmin	Xmax	C	K	P
I1 Costes directos	€	DS	0	10000	7000	2.5	4
I2 Costes de mantenimiento	€	DS	0	25	17	2.5	4
I3 Emisiones de CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub>	DS	0	13000	6500	0.1	2.5
I4 Energía	MJ	DS	0	130000	65000	0.1	2
I5 Consumo de recursos	puntos	CL	1	9	1	«1	1
I6 Agua	m <sup>3</sup>	DS	0	9	4.5	0.1	2.5
I7 Comfort	puntos	CL	1	12	1	«1	1
I8 Adaptabilidad	puntos	CL	1	3	1	«1	1
I9 Tiempo de ejecución	puntos	DL	1	3	1	«1	1
I10 Instalaciones	puntos	CL	1	3	1	«1	1
I11 Seguridad en construcción	puntos	CL	1	3	1	«1	1
I12 Seguridad en servicio	puntos	CL	1	3	1	«1	1

turales se encuentran fácilmente o están en peligro por una insuficiencia en la cantidad de material a nivel mundial.

- Con respecto al reciclaje de los materiales, el potencial de reciclaje busca evaluar la medida en que los materiales pueden usarse después de que finaliza el ciclo de vida. El indicador se calibró puntuando de 1 a 5 dependiendo de si el material se puede usar como relleno sanitario, se puede infundir, reciclar, reciclar o reutilizar, respectivamente.
- En cuanto al potencial para el uso de materiales reciclados, el subindicador evalúa si la alternativa considerada puede hacer uso de materiales previamente utilizados, y el subindicador se calificó entre 1 y 3.

Para obtener I6, los puntos totales otorgados a cada subindicador se agregan directamente, dando un número entre 1 y 9.

### 2.3.3. Requerimiento social

Los criterios sociales que se han utilizado en este modelo son dos: percepción (C5) y seguridad (C6).

En primer lugar, el criterio C5 tiene como objetivo medir qué tan bien el elemento estructural se adapta a su contexto y cómo es percibido por sus usuarios y la comunidad local. Este primer criterio abarca cuatro indicadores diferentes: comodidad del usuario (I7), adaptabilidad al contexto (I8), tiempo de construcción (I9) e instalaciones (I10). La comodidad del usuario (I7) cubre cuatro áreas: comodidad acústica, esbeltez, calidez del material y luz. Estas áreas fueron elegidas después de la investigación realizada por varios autores sobre el impacto en la percepción individual de los materiales y las formas. El segundo indicador, la adaptabilidad al contexto I8, tiene como objetivo medir el nivel en el que un elemento estructural puede personalizarse para adaptarse a las características locales, como el emblema de una región. El indicador I9, tiempo de construcción, mide el grado en que una mayor duración de un proceso de construcción puede afectar negativamente la forma en que se percibe, y viceversa. El cuarto indicador, I10, es una medida de si los elementos de servicio como las tuberías que deben instalarse en el techo pueden instalarse fácilmente a través del elemento estructural. Esto se ha considerado por dos razones: en primer lugar, porque puede afectar la estética del

interior del edificio; segundo, porque puede introducir dificultades en el proceso de construcción.

El criterio adoptado para la seguridad (C6) se compone de dos indicadores: seguridad durante la construcción (I11) y seguridad durante el servicio (I12). Debe tenerse en cuenta que la seguridad estructural durante la construcción y el servicio se considera cubierta al aplicar las normas de diseño. En este sentido, todas las alternativas tienen la misma seguridad estructural. Sin embargo, el propósito de estos indicadores es evaluar los riesgos involucrados durante el manejo en las etapas de construcción y servicio de los elementos estructurales. Ambos indicadores se califican en una escala entre 1 y 3 correspondiente a niveles de seguridad bajo, medio y alto.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Escenario determinista

Los valores de los indicadores para cada una de las alternativas se pueden obtener mediante la cuantificación de cada indicador y las funciones de valor respectivas. Los valores se obtuvieron de bases de datos y seminarios con expertos como se describe en la sección anterior.

Los valores de cada uno de los índices de las alternativas con respecto al índice de sostenibilidad global (IS) se muestran en la figura 5.

En primer lugar, realizando un análisis por requerimientos, los resultados permiten afirmar que las armaduras de hormigón armado, acero y madera presentan los mejores resultados para el requisito económico en comparación con las dos soluciones de vigas hechas con hormigón o madera pretensados. Esto se debe principalmente a que los costos directos asociados con la producción del concreto pretensado son particularmente costosos en comparación con las otras soluciones. En cuanto a la viga de madera, sus costos de producción son muy altos debido a la gran envergadura de la viga. Sin embargo, los costos de instalación, transporte y mantenimiento son similares en todas las alternativas.

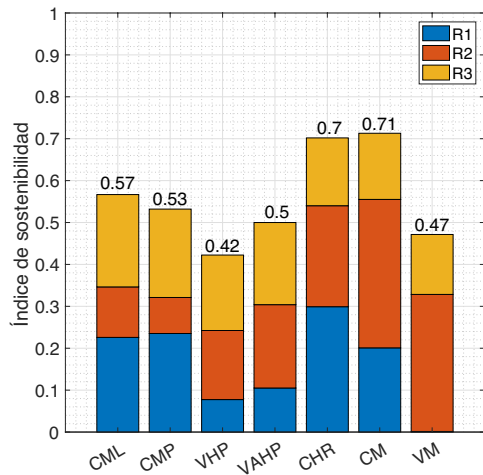


Figura 5. Resultados del análisis determinista para el IS.

En cuanto a los requisitos ambientales, los elementos más altos se obtienen con los elementos hechos con madera, mientras que los más bajos corresponden a las armaduras de acero. A pesar de que el acero es ambientalmente atractivo debido al hecho de que casi la totalidad del material puede ser reciclado, su producción genera una gran cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y, en consecuencia, ambas alternativas de acero tienen un puntaje muy bajo en el criterio 3. Además, la cantidad de agua necesaria para su producción es relativamente significativa en comparación con la madera y el hormigón.

Finalmente, con respecto al requisito social, ambas armaduras de acero presentan los índices más altos, a pesar de que es necesario enfatizar que en este caso la dispersión del requisito es mucho menor que en los casos económicos y ambientales. Las celosías son los elementos que alcanzan los valores más altos del criterio 5, esto debido al hecho de que estas puntúan más alto en términos de luz en el interior del edificio.

A la luz de los resultados, se puede ver que el armazón de la madera obtiene el índice máximo (IS = 0.71), aunque su índice es seguido de cerca por la armadura de hormigón (IS = 0.70); Junto a estas alternativas, el braguero de acero plano (IS = 0.57) y el braguero de acero inclinado (IS = 0.53) alcanzan los índices cuarto y quinto más altos, aunque nuevamente ambos valores son bastante similares; Las tres últimas alternativas son el hormigón pretensado aligerado, la viga de madera y el hormigón pretensado, con un IS de 0.50, 0.47 y 0.42, respectivamente. Sin embargo, la solidez de los resultados debe examinarse en vista del hecho de que puede haber incertidumbres en algunos de los resultados. Principalmente, las armaduras de hormigón y madera logran valores de IS muy similares; lo mismo ocurre con las armaduras de acero y con el hormigón pretensado y las vigas de madera.

El análisis de sensibilidad se describe en la siguiente sección.

#### 4.2. Escenario probabilista

Para comprobar la robustez de los resultados, se realizó un análisis de sensibilidad. Se recurrió al método de Monte Carlo para abordar el problema de manera probabilística. Como del Caño et al. 2012 describe, para aplicar el método, es necesario definir las funciones de distribución de aquellos valores tratados probabilísticamente.

Una vez definidos, las siguientes fases cubren las simulaciones: generar valores pseudoaleatorios y evaluar el modelo con los valores obtenidos. Finalmente, es posible obtener un histograma de frecuencia de IS, así como su función de distribución acumulativa. Esta última curva permite comprender e interpretar mejor los resultados del análisis estadístico.

Para el presente estudio se han considerado dos escenarios probabilísticos. El primero admite incertidumbres en los datos, mientras que el segundo tiene las incertidumbres en el sistema de ponderación. En ambos escenarios, los parámetros constitutivos de las funciones de valor se mantuvieron como se definieron originalmente. La figura 6 recoge los resultados del análisis de sensibilidad. La misma está compuesta por diagramas de cajas en los cuales se indican los valores mínimos y máximos obtenidos del IS para cada alternativa, así como los respectivos cuartiles y la mediana. El primer escenario, donde se introducen incertidumbres en los indicadores, se muestra en la figura 6(a). Se puede observar que se mantiene la clasificación obtenida en el enfoque determinista. De la misma forma, en el segundo escenario, donde se introdujeron incertidumbres a través del sistema de ponderación, los resultados se muestran en la Figura 6(b). Como se puede ver, nuevamente, la clasificación en términos del IS se mantiene para todas las alternativas.

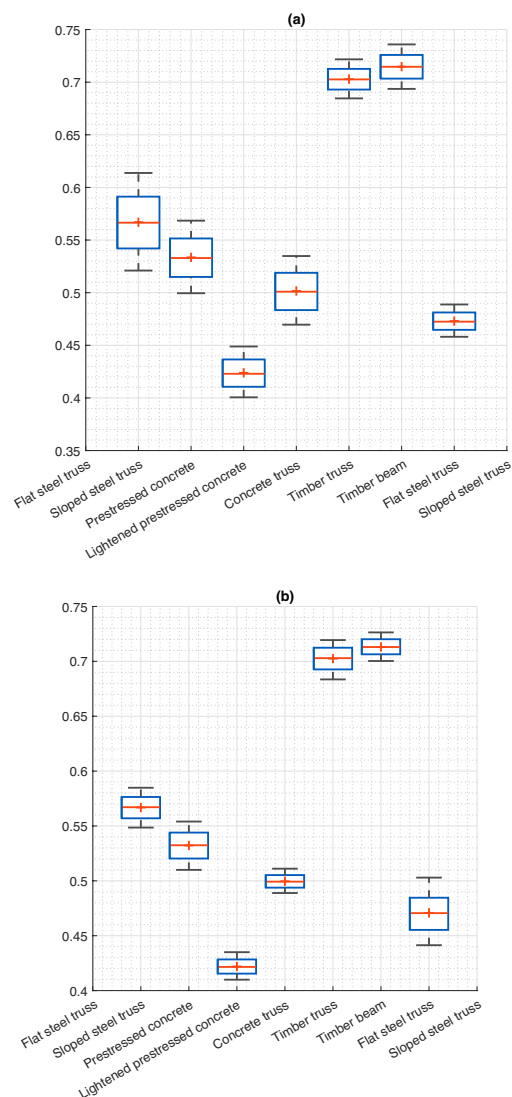


Figura 6. Resultados del análisis probabilista, con incertidumbre en los indicadores (a) y en los pesos (b)

## 5. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha propuesto un modelo multicriterio para la evaluación de la sostenibilidad basado en el método MIVES. El modelo puede usarse para evaluar la sostenibilidad de elementos estructurales de diferentes materiales.

En particular, el modelo desarrollado se ha utilizado para evaluar la sostenibilidad de las armaduras y vigas estructurales fabricadas con diferentes materiales para techos no accesibles de pabellones deportivos. El caso de estudio consistió en siete alternativas, a saber: una armadura de acero plana, una armadura de acero inclinada, una viga de hormigón pretensado, una viga de hormigón pretensado aligerada, una armadura de hormigón, una armadura de madera y una viga de madera. Las conclusiones específicas que se derivan del análisis se resumen a continuación:

- El método basado en MIVES utilizado ha demostrado ser una herramienta de evaluación de sostenibilidad adecuada; de la distribución. Las funciones de valor permiten llevar el paso de la normalización a otro nivel al permitir evaluar los indicadores de una manera que sean sensibles a ciertas partes de la distribución. La sostenibilidad de los elementos estructurales hechos de diferentes materiales se ha evaluado considerando tres requisitos, seis criterios y doce indicadores.
- En cuanto a los requisitos, económicamente la mejor solución es la armadura de hormigón. Las alternativas que alcanzan los índices más altos son la viga y la armadura de madera. Finalmente, socialmente todas las alternativas arrojan resultados muy similares, siendo las alternativas de acero ligeramente mejores.
- Las diferencias en términos del índice de sostenibilidad de las cerchas de madera y hormigón armado y de las vigas de madera y hormigón pretensado no son significativas.
- Al realizar un análisis de sensibilidad, se puede concluir que los resultados son sólidos: los cambios en el valor de los indicadores o en los pesos asignados producen las mismas clasificaciones entre las soluciones.

Como consideración de las conclusiones mencionadas anteriormente, vale la pena señalar que la madera generalmente se considera uno de los materiales de construcción más sostenibles, aunque esto puede ser engañoso. Los resultados del análisis muestran que, aunque la madera es respetuosa con el medio ambiente, puede ser un factor estresante económico dependiendo del elemento estructural para el que se utiliza. En particular, el braguero de madera laminada encolada analizada funciona bien en términos de sostenibilidad; Por el contrario, la viga de madera está clasificada como una de las peores opciones debido a los altos costos de su producción. Con respecto al concreto, a pesar de que tiene una percepción negativa entre la sociedad, en realidad puede ser una alternativa sostenible, como lo muestran los resultados del armazón concreto. Actualmente, las armaduras de hormigón no se utilizan como alternativa estructural en los techos, mientras que las armaduras de acero se usan ampliamente; Esto a pesar del hecho de que en realidad los primeros funcionan bien en términos de sostenibilidad en contraste con los posteriores.

En vista de las conclusiones anteriores, es necesario que los

estudios futuros se centren en la comparación de los índices de sostenibilidad de diferentes materiales de construcción, así como en el análisis de las razones por las cuales las opciones más sostenibles son las menos utilizadas. Estos futuros estudios contribuirían a avanzar hacia estructuras enmarcadas más sostenibles.

### Agradecimientos

Irene Josa i Culleré ha contado con la ayuda otorgada por la Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) del Govern Català con número de referencia FI\_B 00655. Por otro lado, el coautor Oriol Pons Valladares es un Profesor Serra Hunter.

Además, los autores también quisieran expresar sus agradecimientos a Pilar Giraldo, Sergio Gallego y Andrés Izuzquiza, quienes han aportado recomendaciones y sugerencias, y al Ministerio Español de Economía, Industria y competitividad por el soporte económico dentro del proyecto SAES (BIA2016-78742-C2-1-R).

### Referencias

- [1] Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, P., Gómez, J. & Josa, A. (2012) Sustainability assessment of concrete structures. The EHE approach. *Journal of Construction Engineering and Management*. ASCE. Vol. 138 (2): 268-276
- [2] Cartelle Barros, J.J., Lara, M., de la Cruz, M.P., & del Caño, A. (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy*, 89, 473-489.
- [3] Ding, G. K. C. (2008). Sustainable construction — The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86, 451-464.
- [4] de la Fuente, A., Pons, O., Josa, A., & Aguado, A. (2016). Multi-Criteria Decision Making in the sustainability assessment of sewerage pipe systems. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4762-4770.
- [5] de la Fuente, A., Blanco, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017). Sustainability based- approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 179-188.
- [6] de la Fuente, A. & Fernández-Ordoñez, D. (2018). A multi-criteria decision-making based approach to assess the sustainability of concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 442
- [7] de la Fuente, A., Casanovas-Rubio, M.M., Pons, O., Armengou, J. (2019). Sustainability of column-supported RC slabs: fiber reinforcement as an alternative. *J. Constr. Eng. Manage*, 2019, 145(7).
- [8] del Caño, A., Gómez, D., & Cruz, M. P. De. (2012). Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method, 37, 865-873
- [9] Fib. (2018). Sustainability of precast structures. *FIB bulletin*, 88. ISBN: 978-2-88394-128-1
- [10] Govindan, K., Shankar, K. M., & Kannan, D. (2016). Sustainable material selection for construction industry – A hybrid multi criteria decision making approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1274-1288.
- [11] Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools, 28, 469-482.
- [12] Harris, D. J. (1999). A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials, 34(6), 751-758
- [13] Hosseini, S.M.A., de la Fuente, A., & Pons, O. (2016). Multicriteria decision-making method for sustainable site location of post-disaster temporary housing in urban areas. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9).

- [14] Kim, E., Jung, J., ... Choi, Y. & Kwon, J. (2018). Economic and environmental sustainability and public perceptions of rooftop farm versus extensive garden. *Building and Environment*, 146(August), 206–215.
- [15] Levin, H. (1997). Systematic evaluation and assessment of building environmental performance. In *Second International Conference Buildings and the Environment* (pp. 3–10).
- [16] Moakher, P.E., & Pimplikar, S. S. (2012). Building Information Modeling (BIM) and Sustainability – Using Design Technology in Energy Efficient Modeling, 1(2), 10–21.
- [17] Pardo-Bosch, F., & Aguado, A. (2015). Investment priorities for the management of hydraulic structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(10), 1338–1351.
- [18] Pons, O., & Aguado, A. (2012). Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain. *Building and Environment*, 53, 49–58.
- [19] Pons, O., & de la Fuente, A. (2013). Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns. *Construction and Building Materials*, 49, 882–893.
- [20] Pons, O., de la Fuente, A., & Aguado, A. (2016). The use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications. *Sustainability*, 8(5), 1-15.
- [21] Pujadas, P., Pardo-bosch, F., Aguado-Renter, A., & Aguado, A. (2017). Land Use Policy MIVES multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects. A case study in the city of Barcelona. *Land Use Policy*, 64, 29–37.
- [22] San-José Lombera, J.T., Garrucho Aprea, I. (2010). A system approach to the environmental analysis of industrial buildings, 45, 673–683.
- [23] Sieffert, Y., Huygen, J. M., & Daudon, D. (2014). Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering e architecture collaboration. *Journal of Cleaner Production*, 67, 125–138.
- [24] Vefago, L. H. M., & Avellaneda, J. (2013). Resources, Conservation and Recycling Recycling concepts and the index of recyclability for building materials. *"Resources, Conservation & Recycling,"* 72, 127–135
- [25] Zuo, J., & Zhao, Z. (2014). Green building research – current status and future agenda: A review Why? How? How? What? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281.