

02-033

STUDY OF SOLUTIONS FOR THE DESIGN OF A FOOTBRIDGE BASED ON A HIERARCHICAL ANALYTICAL PROCESS

Yepes-Bellver, Víctor J. (1); Alcalá, Julián (1); Yepes, Víctor (1)

(1) Universitat Politècnica de València

This paper shows the application of the AHP (Analytic Hierarchy Process) methodology to carry out the study of solutions required to design a footbridge. Four alternatives have been considered: concrete beam, in-situ concrete, steel beam, and steel truss. After a qualitative study of the advantages and disadvantages of the proposed typologies, a hierarchy of criteria was established based on economy, ease of construction, functionality, integration into the environment, aesthetics, and durability. In turn, eleven sub-criteria dependent on these criteria have been analyzed. A round of consultations was carried out to evaluate the paired comparison matrices, with a group of five experts who, by successive approximations, agreed on the comparison ratings. All the comparison matrices used were checked for consistency. After applying the complete decision-making methodology, the solution chosen was the lattice footbridge due to its higher final evaluation.

Keywords: Footbridge; decision-making; multi-criteria decision; AHP; sustainability; design

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA EL PROYECTO DE UNA PASARELA BASADO EN UN PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

El presente trabajo muestra la aplicación de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) para realizar el estudio de soluciones necesario para el proyecto de una pasarela. Para ello se han planteado cuatro alternativas: viga de hormigón, hormigón ejecutado "in situ", viga metálica y celosía metálica. Tras realizar un estudio cualitativo de las ventajas e inconvenientes de las tipologías planteadas, se procede a establecer una jerarquía de criterios basados en la economía, la facilidad constructiva, la funcionalidad, la integración en el entorno, la estética y la durabilidad. A su vez, se han analizado once subcriterios dependientes de aquellos. Para evaluar las matrices de comparación pareada se ha realizado una ronda de consultas a un grupo de cinco expertos que, por aproximaciones sucesivas, han acordado las valoraciones de comparación. Se ha comprobado, a su vez, la consistencia de todas las matrices de comparación utilizadas. Tras aplicar la metodología completa de toma de decisiones, la solución elegida, por su mayor valoración final, fue la pasarela en celosía.

Palabras clave: Pasarela, toma de decisiones; decisión multicriterio; AHP; sostenibilidad; proyecto

Correspondencia: Víctor Yepes. Correo: vyepesp@cst.upv.es

Agradecimientos: Grant PID2020-117056RB-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by "ERDF A way of making Europe".



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Uno de los aspectos básicos en el desarrollo de un proyecto de una obra es determinar la mejor alternativa posible para resolver un problema. Este aspecto es clave para la eficiencia de la solución desarrollada finalmente, afectando a los beneficios esperados de una infraestructura (Yepes, Pellicer & Ortega, 2012). Por esta razón, en las titulaciones relacionadas con la ingeniería y la arquitectura, existen materias donde se imparten proyectos. De hecho, la empleabilidad de estos egresados está muy conectada con la adquisición de las competencias de cada título (Torres-Machí et al., 2013).

En particular, el estudio de soluciones en los proyectos ha sido uno de los elementos clave. Un proyecto estudia distintas alternativas para resolver un problema. Tras comprobar la viabilidad técnica y económica, se descartan las opciones no viables o con gran incertidumbre. A partir de ese momento, se opta por la solución que optimice un conjunto de criterios económicos, sociales y medioambientales (Torres-Machí et al., 2015; Sierra, Pellicer & Yepes, 2017). Incluso es posible integrar las técnicas de optimización multiobjetivo con la toma de decisión multicriterio (García-Segura, Penadés-Plà & Yepes, 2018).

Antes de realizar un estudio comparativo entre las soluciones disponibles, estas deberían ser óptimas (Payá-Zaforteza et al., 2010; Torres-Machí et al., 2014). Además, la mejora debería realizarse a lo largo del ciclo de vida de las infraestructuras (Navarro et al., 2018; 2020). Una vez se disponen de las alternativas viables y optimizadas, se seleccionará la mejor atendiendo a una serie de criterios. Los métodos de toma de decisión multicriterio resuelven este tipo de problemas (Navarro et al., 2019).

Para elegir la mejor opción a menudo se utiliza el método de las medias ponderadas. Se valora cada solución según los criterios establecidos. A continuación se aplica un peso a cada criterio. Por último, se suma para cada alternativa el producto de cada puntaje por el peso de cada criterio. De este modo se elige la solución con mayor puntuación obtenida. Esta forma de elegir la solución presenta problemas relacionados con la subjetividad en la asignación de los pesos para cada uno de los criterios y en la valoración de los que no son objetivos. De hecho, no es extraño que un estudiante o un profesional que está elaborando un estudio de soluciones tengan una opción preferida de antemano. Luego basta ajustar los pesos y las valoraciones en los criterios subjetivos para justificar la solución elegida a priori.

Con objeto de asignar los pesos y en la asignación de valores a los criterios subjetivos existen métodos como el Proceso Analítico Jerárquico, conocido como AHP (*Analytic Hierarchy Process*). AHP fue desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980 para resolver problemas de decisión multiatributo (Saaty, 2013). Este método se ha empleado en el ámbito de la ingeniería civil (Raviv, Shapira & Fishbain, 2017). Un estudio bibliométrico al respecto se puede consultar en Zyoud y Fuchs-Hanusch (2017). En este trabajo se presenta la aplicación de AHP al estudio de una pasarela ciclopeatonal biapoyada, con una luz de 30,00 m, una anchura de 5,00 m y un gálibo de 7,00 m. Para ello se analizan cuatro alternativas posibles. La estructura de criterios y subcriterios, así como las comparaciones se han realizado por consenso de un grupo de cinco expertos.

2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo se pueden resumir en los siguientes: analizar cuatro posibles soluciones para resolver el problema de un paso superior para ciclistas y peatones; establecer una jerarquía de criterios y subcriterios que permita evaluar cada una de las soluciones planteadas y, como consecuencia de lo anterior, aplicar la metodología AHP para tomar una decisión respecto a la mejor de las soluciones propuestas.

2. Metodología

El estudio de soluciones se realiza utilizando AHP. Se estructura un problema multicriterio construyendo una jerarquía de atributos, la cual contiene el objetivo global del problema, los distintos criterios y subcriterios y las alternativas que sobre las que se quiere decidir (Moreno-Jiménez, 2002). Esta técnica se implementa de la siguiente forma: desarrollo de una jerarquía, representación de juicios de valor, construcción de matrices de juicio de valor y matrices normalizadas, cálculo de la priorización y consistencia, y análisis de los resultados. Por tanto, se trata de comparar por parejas los criterios o bien las distintas alternativas referidas a un criterio o subcriterio. El responsable manifiesta su predilección entre dos elementos y expresa en forma numérica su importancia relativa. Se utiliza para ello la llamada Escala Fundamental, que ha dado por muy buenos resultados empíricos en situaciones muy diversas (Tabla 1).

Tabla 1: Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980)

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente el criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2, 4, 6 y 8	Valores intermedio entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Una vez realizada la comparación, se debe calcular el peso de cada criterio. Esta valoración es posible realizarla para criterios objetivos medibles, pero existen múltiples criterios difícilmente evaluables, que solo pueden ser comparados entre sí. En AHP, el peso asociado a cada criterio es el componente del autovector vinculado con el autovalor dominante de la matriz de comparación por pares.

Sin embargo, se debe comprobar que la matriz es consistente, es decir, que no existen contradicciones internas entre las comparaciones. Para eso se evalúa la inconsistencia de los juicios por medio de la Razón de Consistencia *CR*, que es el cociente entre el Índice de Consistencia *CI* y el Índice Aleatorio *RI*, y debe ser inferior un porcentaje que depende del tamaño de la matriz. El índice aleatorio *RI* varía con el tamaño de la matriz *n*, y toma los valores recogidos en la Tabla 2 (Aguarón & Moreno-Jiménez, 2003).

Tabla 2: Valores del índice de consistencia aleatorio

<i>n</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>RI</i>	0,000	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535

Según el criterio de Saaty (1997), son aceptables inconsistencias inferiores al 10% para matrices de rango $n > 4$ (5% para $n = 3$ y 8% para $n = 4$). Si no fuera así, se deben reconsiderar los juicios realizados o desechar la matriz. Por otra parte, *CI* depende de λ_{max} , que es el máximo autovalor, y del tamaño de la matriz *n* a través de la expresión (1):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Tras comprobar la consistencia, se calcula la importancia relativa de los criterios o la prelación de cada opción respecto a un criterio. Se puede utilizar la propuesta original de AHP para este cálculo (Saaty, 2003). Se emplea el método del autovector principal por la derecha, lo que supone solucionar la expresión (2), donde A es la matriz de comparación, w el vector de preferencias, y λ_{max} el autovalor.

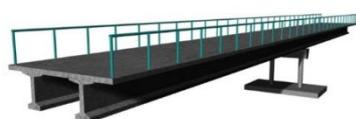
$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (2)$$

3. Caso de estudio

El caso de estudio se refiere al proyecto de una pasarela ciclopeatonal en el Anillo Verde Metropolitano Sur de Valencia sobre la línea Valencia-Villanueva de Castellón de FGV. PK 1,5 de la carretera CV-407 (Yepes-Bellver, 2021). La pasarela es biapoyada, con una luz de 30,00 m, una anchura de 5,00 m y un gálibo a salvar de 7,00 m.

En este trabajo se presenta el estudio de un conjunto de soluciones que puedan resolver el problema atendiendo a los condicionantes existentes y la tipología, materiales y geometría. Para ello se confrontan las ventajas e inconvenientes de los tipos de pasarelas a estudiar (Figura 1). Después, se aplicará la toma de decisiones multicriterio AHP. Queda descartada la Alternativa 0, que sería no realizar ningún tipo de actuación. Si fuera así, tanto los viandantes como los ciclistas no podrían cruzar con comodidad de un lado al otro.

Figura 1: Tipologías de pasarelas planteadas en el estudio de soluciones



Pasarela de vigas de hormigón prefabricadas bajo losa de hormigón



Pasarela de vigas metálicas sobre losa de hormigón



Pasarela peatonal de hormigón ejecutado "in situ"



Pasarela peatonal metálica en celosía

La pasarela en viga de hormigón consta de dos elementos prefabricados de sección en doble "T" y una losa superior constituida por unas prelosas no colaborantes sobre las que se vierte hormigón "in situ". Esta tipología interesa por su resistencia y facilidad constructiva, pues las vigas pueden montarse una a una sobre las pilas para construir el tablero por encima. De esta forma se evita colocar cimbras apoyadas sobre el terreno. Las vigas trabajan fundamentalmente a flexión, por lo que se pretensan, reduciendo el refuerzo pasivo. Una dificultad es el traslado de las vigas a obra, pues si se superan los 12 m, requiere un transporte especial. Una variante sería unir las vigas en obra antes de colocarlas. También se deberían considerar los conectores que solidarizan la viga con la losa.

Otra solución es la pasarela de hormigón ejecutada “in situ” con una sección en cajón postesado con voladizos laterales de espesor variable. Esta estructura es más eficiente que las alternativas de las vigas, siendo ventajosa la adaptabilidad a cualquier tipo de geometría. No obstante, una de las principales dificultades es el procedimiento constructivo.

Una alternativa la constituye una pasarela de vigas metálicas armadas, terminada con una losa de hormigón armado ejecutado en obra, o bien con una losa metálica. Las vigas se montan con chapas metálicas soldadas y sobre ellas se colocan unas prelosas de 7 cm y un tablero de hormigón “in situ” hasta llegar a unos 25 cm de espesor. Entre las ventajas está su facilidad constructiva respecto a las vigas prefabricadas, debido a su menor peso. Lo habitual son dos vigas para mejorar la eficacia del tablero, que se puede rigidizar tanto longitudinal como transversalmente.

Tabla 3: Ventajas e inconvenientes de las tipologías de pasarelas planteadas

Tipologías	Ventajas	Inconvenientes
Viga de hormigón	Reducción de materiales al concentrar la rigidez longitudinal en las vigas Montaje sencillo, viga a viga. Sin necesidad de cimbras o apoyos en el terreno	Los elementos resistentes se encuentran bajo rasante, lo cual puede entorpecer el gálibo establecido Impacto estético negativo de grandes vigas frente otras tipologías Transporte especial de grandes piezas estructurales por carretera
Hormigón “in situ”	Adaptación a geometría compleja Con tableros losa, posibilidad de adaptarse a cantos reducidos con pequeñas alturas de la rasante La losa maciza es menos eficiente estructuralmente que las vigas	Precisa cimbras, que si son apoyadas, entorpecen el paso Construcción poco industrializada, con mayores plazos, dependiente del clima
Viga metálica	Puesta en obra sencilla, con medios convencionales Más económicos para luces medias o altas Peso propio reducido y cantos inferiores a los análogos de hormigón	Mantenimiento para proteger contra la corrosión Problemas con la rasante, que puede entorpecer el gálibo establecido
Celosía	Las vigas en celosía se encuentran por encima de la rasante, por lo que se respeta el gálibo mínimo Buena disposición estética Montaje en taller y emplazamiento con medios convencionales	Mantenimiento para proteger contra la corrosión

La solución con una viga de celosía metálica es común en este tipo de pasarelas. Se compone de cordones superiores e inferiores triangulados con diagonales, de forma que cada barra resiste una carga axial. Los momentos se soportan con la compresión y tracción de los cordones, y el cortante con el esfuerzo axial de las diagonales y montantes. Se admite un modelo simplificado donde las uniones se consideran articuladas y las cargas se aplican sobre los nudos. En esta tipología, la eficiencia estructural depende de la geometría. En la celosía tipo Warren, los triángulos son equiláteros, por lo que se simplifica el número de barras para

la misma luz. Eso no ocurriría con la celosía Pratt o Howe, donde se adosan triángulos rectángulos. En la celosía Pratt, las barras verticales trabajan a compresión, mientras las diagonales lo hacen a tracción. En las Howe, las diagonales están comprimidas y es una solución peor a la anterior. Es por ello que se elige la celosía Warren, pero con una geometría de canto variable, pareciéndose a un arco bowstring. Esta disposición, además de ser visualmente más atractiva, se adapta a las leyes de esfuerzos de una viga biapoyada con carga uniforme, mejorando la eficiencia estructural. El inconveniente sería la mayor complejidad en la construcción del cordón curvo y las distintas longitudes de las barras diagonales. No obstante, estos problemas se ven compensados por la eficiencia estructural y la estética de la solución.

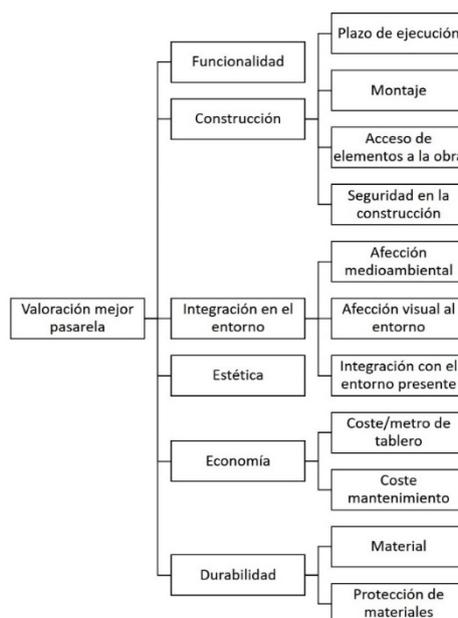
La Tabla 3 recoge algunas de las ventajas e inconvenientes de las tipologías analizadas. Estas características permitirán realizar una valoración mediante comparación pareada de cada una de las soluciones respecto a cada subcriterio.

4. Resultados

El método AHP requiere una jerarquía de criterios y subcriterios. Su identificación permite la resolución de un problema o la consecución de un objetivo. Para decidir qué pasarela es la más adecuada, se utilizó el árbol de criterios y subcriterios mostrado en la Figura 2. Dicha estructura se organiza en seis criterios y once subcriterios. Tanto la estructura jerárquica como la comparación pareada entre criterios, subcriterios y alternativas se realizaron por consenso de cinco expertos en diseño estructural, por aproximaciones sucesivas (Dong et al., 2010). Los criterios empleados para seleccionar a los expertos fueron los siguientes: titulación universitaria de ingeniero de caminos y una experiencia mínima de ocho años en el proyecto de estructuras y puentes. Se dieron varias rondas hasta alcanzar el consenso.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos obedecen tanto al consenso de los expertos como al caso particular analizado. Es por ello que el lector puede diferir en alguna de las valoraciones reflejadas en los resultados, que dependen de este caso particular.

Figura 2: Jerarquía de criterios y subcriterios en la toma de decisiones



Una vez establecidos los criterios, se realiza una comparación pareada utilizando la Escala Fundamental (Tabla 1). Así, para cotejar los criterios primarios, se ha construido la Tabla 4,

donde aparecen confrontados dos criterios. Por ejemplo, se ha determinado que la construcción es moderadamente más importante que la funcionalidad, por lo que se coloca el símbolo “•” en dicha casilla. Del mismo modo se procede con los restantes criterios. Cabe señalar que este procedimiento permite transformar de forma eficiente, la opinión sobre la importancia de criterios que pueden tener una valoración subjetiva. La experiencia empírica indica que este procedimiento ha dado buenos resultados en muchos campos.

Tabla 4: Comparación pareada entre los criterios primarios

CRITERIO	Escala de importancia										SUBCRITERIO	
	Extremadamente importante	Mucho más importante	Bastante más importante	Moderadamente más importante	Igual de importante	Moderadamente menos importante	Bastante más importante	Mucho más importante	Extremadamente importante			
Funcionalidad											•	Construcción
											•	Integración
											•	Estética
											•	Economía
											•	Durabilidad
Construcción						•						Integración
						•						Estética
						•						Economía
						•						Durabilidad
Integración						•					•	Estética
						•					•	Economía
						•					•	Durabilidad
Estética						•					•	Economía
						•					•	Durabilidad
Economía						•						Durabilidad

La Tabla 5 muestra la matriz de comparación pareada y el vector propio de los criterios. La matriz es recíproca, es decir, si la construcción es moderadamente importante respecto a la funcionalidad, el valor es $3/1 = 3$. Pero al comparar la funcionalidad con la construcción, dicho valor es $1/3$. Además, la matriz es homogénea, pues el valor de la diagonal es 1 (un criterio es igual de importante respecto a sí mismo). Aquí, A es una matriz $n \times n$, donde a_{ij} indica el valor relativo del criterio i en relación con el j , atendiendo a la Escala Fundamental de Saaty. Cuando $i=j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se compara el criterio consigo mismo. Se observa que $CR = 0,01$, lo que permite avalar la consistencia. Se ha recogido el vector propio, que indica que la economía y la construcción son los criterios con mayor peso, mientras que la integración es el criterio de menor importancia relativa.

Tabla 5: Matriz de comparaciones pareadas y vector propio de los criterios

	Funcionalidad	Construcción	Integración	Estética	Economía	Durabilidad	Vector propio
Funcionalidad	1/1	1/3	1/1	1/1	1/2	1/1	0,1123
Construcción	3/1	1/1	3/1	2/1	1/1	2/1	0,2751
Integración	1/1	1/3	1/1	1/1	1/3	1/1	0,1050
Estética	1/1	1/2	1/1	1/1	1/2	1/1	0,1202
Economía	2/1	1/1	3/1	2/1	1/1	3/1	0,2751
Durabilidad	1/1	1/2	1/1	1/1	1/3	1/1	0,1123
CR	0,01						

A continuación, se procede a realizar los mismos cálculos, pero comparando en cada criterio,

los subcriterios entre sí. Procediendo de forma análoga a la anterior, se obtienen las matrices de comparación pareada, los autovalores y el índice *CR* que indicará si la matriz es consistente. Solo se presenta el proceso para uno de los subcriterios, para el resto se procede análogamente. En la Tabla 6 se ha recogido la comparación entre los subcriterios. En este caso se ha considerado relevante atender al plazo de ejecución, a la facilidad del montaje y ejecución, al acceso de los elementos a la obra y la seguridad en la construcción.

Con la valoración de la comparación pareada es posible establecer la matriz de decisión y el vector propio de los subcriterios (Tabla 7). El vector propio indica que el plazo de ejecución y la seguridad en la obra son los subcriterios con mayor peso dentro de este criterio de construcción y montaje. Por otra parte, como el índice *CR* es nulo, se comprueba la consistencia de las valoraciones recibidas en la matriz de comparaciones pareadas.

Seguidamente se muestran las matrices de decisión y de los pesos para los subcriterios y para cada una de las alternativas. Se indica únicamente el cálculo para un subcriterio, pues se procede para el resto de subcriterios de forma similar.

Tabla 6: Comparación pareada entre los subcriterios de construcción y montaje.

	Extremadamente importante	Mucho más importante	Bastante más importante	Moderadamente más importante	Igual de importante	Moderadamente más importante	Bastante más importante	Mucho más importante	Extremadamente importante	
Plazo de ejecución					•					Montaje
					•					Acceso de elementos a obra
					•					Seguridad en la construcción
Montaje					•					Acceso de elementos a obra
						•				Seguridad en la construcción
Acceso de elementos a obra						•				Seguridad en la construcción

Tabla 7: Matriz de decisión de los subcriterios respecto al criterio de construcción

	Plazo de ejecución	Montaje	Acceso de elementos a obra	Seguridad en la construcción	Vector propio
Plazo de ejecución	1/1	2/1	2/1	1/1	0,3333
Montaje	1/2	1/1	1/1	1/2	0,1667
Acceso de elementos a obra	1/2	1/1	1/1	1/2	0,1667
Seguridad en la construcción	1/1	2/1	2/1	1/1	0,3333
<i>CR</i>			0,00		

Tabla 8: Matriz de decisión de los subcriterios respecto al criterio de construcción

	Plazo de ejecución	Montaje	Acceso elementos	Seguridad
Viga-Hormigón	0,3598	0,1472	0,0723	0,4327
In situ hormigón	0,0813	0,0646	0,4067	0,0883
Viga metal	0,3598	0,2404	0,1143	0,2395
Celosía	0,1991	0,5479	0,4067	0,2395

También se tienen los pesos relativos de cada uno de los subcriterios, que se refleja en la Tabla 9.

Tabla 9: Vector de los pesos relativos de cada uno de los subcriterios relativo a la construcción

	Plazo de ejecución	Montaje	Acceso elementos	Seguridad
Pesos	0,3333	0,1667	0,1667	0,3333

Multiplicando la matriz de decisión de los subcriterios por el vector de pesos relativos, se obtiene el peso de cada una de las alternativas (Tabla 10). Para el resto de los subcriterios se calcula el vector de pesos relativos de forma análoga.

Tabla 10. Vector de pesos relativos del subcriterio de construcción

Vector de pesos relativos del subcriterio construcción/montaje	
Viga-Hormigón	0,3008
In situ hormigón	0,1351
Viga metal	0,2589
Celosía	0,3053

A continuación se incluyen las ponderaciones de los subcriterios de economía, integración, y durabilidad. Se obvian los pasos intermedios de cálculo por no afectar a la metodología.

Tabla 11: Matriz de decisión de los subcriterios respecto al criterio de economía, durabilidad e integración

	Relación coste/metro de tablero	Coste de mantenimiento	Afección medioambiental	Afección visual	Integración entorno presente	Durabilidad del material	Protección del material
Viga-Hormigón	0,4668	0,3750	0,0743	0,0837	0,0610	0,3750	0,3750
In situ hormigón	0,0953	0,3750	0,2015	0,2329	0,3111	0,3750	0,3750
Viga metal	0,2776	0,1250	0,1217	0,1385	0,1329	0,1250	0,1250
Celosía	0,1603	0,1250	0,6025	0,5450	0,4949	0,1250	0,1250

Con los pesos relativos de los criterios principales se monta la matriz de decisión. Cada una de las columnas recoge las valoraciones de todas las opciones respecto a cada criterio. En el

caso de la metodología AHP, se emplean los valores del vector propio. De esta forma, la matriz de decisión queda según se recoge en la Tabla 12.

Tabla 12. Matriz de decisión de los criterios principales respecto a las alternativas

	Funcionalidad	Construcción	Entorno	Estética	Economía	Durabilidad
Viga-Hormigón	0,2857	0,3008	0,0733	0,0663	0,4362	0,3750
In situ hormigón	0,1429	0,1351	0,2367	0,2173	0,1885	0,3750
Viga metal	0,2857	0,2589	0,1287	0,1055	0,2267	0,1250
Celosía	0,2857	0,3053	0,5612	0,6109	0,1485	0,1250

A su vez, también tenemos el valor relativo de cada uno de los criterios, que se refleja en la Tabla 13.

Tabla 13. Vector de los pesos relativos de los criterios principales

	Funcionalidad	Construcción	Entorno	Estética	Economía	Durabilidad
Pesos	0,1123	0,2751	0,1050	0,1202	0,2751	0,1123

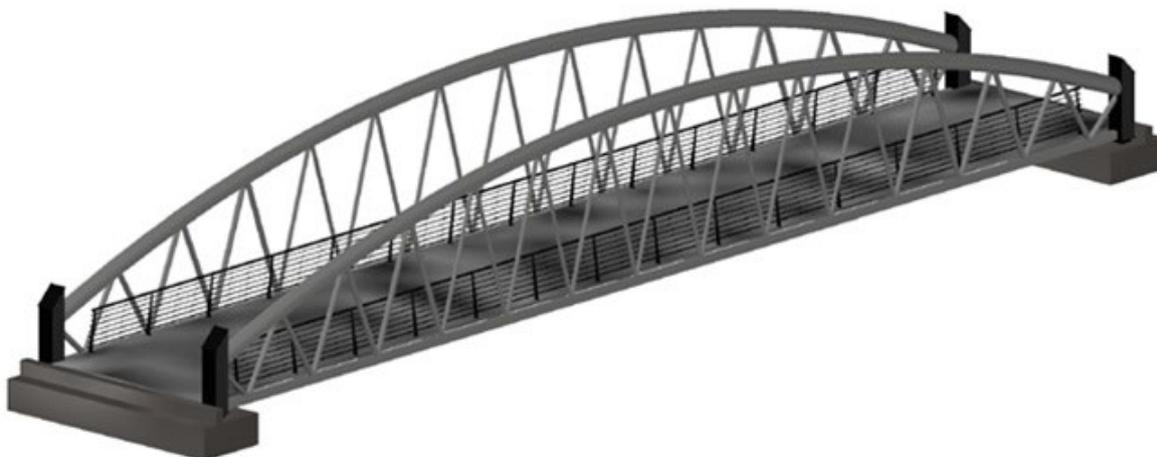
Multiplicando la matriz de decisión de los criterios principales por el vector de pesos relativos, se obtiene el peso de cada una de las alternativas (Tabla 14).

Tabla 14. Valoración final y orden de preferencia de las alternativas

	Valoración final	Orden de preferencia
Viga-Hormigón	0,2926	2
In situ hormigón	0,1982	4
Viga metal	0,2059	3
Celosía	0,3033	1

Por tanto, tras aplicar la metodología AHP, la solución elegida, por su mayor valoración final, es la pasarela en celosía (Figura 3). La segunda de las opciones, a poca distancia, sería la pasarela de vigas prefabricadas bajo losa de hormigón, la tercera sería la viga metálica, y en este caso estudiado, la cuarta opción es la pasarela de hormigón "in situ". El proyecto definitivo de la solución elegida tiene un presupuesto de 119.368,98 euros, correspondiendo el 41,66% al capítulo de estructuras y el 23,13% al de cimentaciones (Yepes-Bellver, 2021).

Figura 3: Tipologías de pasarelas planteadas en el estudio de soluciones



No obstante, el análisis de los resultados nos obliga a reflexionar sobre los mismos. Es importante tener en cuenta que la opción escogida solo se puede considerar válida para este caso determinado, en el entorno y en el contexto propio del problema. Ello quiere decir que, en otra situación, es posible que la alternativa elegida hubiera sido otra.

Así por ejemplo, si observamos la mejor alternativa, criterio a criterio, comprobamos que por razones de economía, durabilidad, construcción y funcionalidad, la mejor opción hubiera sido la pasarela de vigas prefabricadas bajo losa de hormigón. En cambio, la estética, junto con la adecuación al entorno, la funcionalidad y la construcción, son criterios a favor de la elección de la celosía metálica. Es decir, que por motivos puramente económicos no hubiésemos seleccionado la pasarela de celosía, pero el equilibrio con los otros criterios, y sobre todo la estética y la integración en el entorno, han decantado la balanza a su favor.

En esta comunicación también se puede comprobar que, respetando las valoraciones que han realizado los expertos conocedores del caso donde se va a situar la estructura, se llega a un empate técnico entre las dos soluciones que encabezan el ranking. Además, dichas soluciones son propuestas dispares. Este resultado no invalida la metodología, sino que supone que el decisor debe plantearse si ha elegido bien a los expertos o si debe tomar alguna otra consideración en la decisión final. Con todo, es preferible emplear una metodología contrastada como AHP en la toma de decisiones, que la simple asignación subjetiva de pesos, que es más fácil de manipular, para llegar a la solución final.

Como información adicional, en el caso de las pasarelas peatonales, existe actualmente cierta tendencia o moda por la construcción de pasarelas en celosía frente a las vigas de hormigón que puede influir en la opinión de los expertos. Si bien se ha realizado un análisis detallado de los costes (Yepes-Bellver, 2021), la solución en celosía permite resolver, para este caso determinado, los problemas de gálibo y de ejecución rápida que impone la necesidad de ser un paso superior sobre una línea ferroviaria. La reflexión última sería la consulta al cliente respecto a si comparte la opinión de los expertos.

5. Conclusiones

El estudio de la mejor solución viable para un proyecto constituye una de las fases críticas en su redacción. Sin embargo, existe una fuerte predisposición a utilizar del método de las medias ponderadas para seleccionar la mejor de las soluciones. Este procedimiento asigna pesos subjetivos a los criterios. También valora de forma subjetiva criterios o subcriterios con una fuerte componente intangible. Esta característica tiende a utilizar pesos e indicadores que

lleven a una solución que parecía de interés a priori, sirviendo como justificación formal a la decisión tomada. Esta tendencia se vislumbra asimismo por parte de los estudiantes de grados o másteres relacionados con la ingeniería y la arquitectura a la hora de realizar un estudio de soluciones para un proyecto determinado.

Desde hace décadas existen procedimientos para la toma de decisión multicriterio que tratan de superar algunos de estos inconvenientes. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), utilizado con éxito en muchos campos, permite solucionar alguno de estos problemas mediante la comparación pareada entre criterios y alternativas. Si bien interviene también cierta subjetividad en las valoraciones, también es cierto que se deben superar ciertas exigencias matemáticas de consistencia. Ello permite dar coherencia a las valoraciones realizadas. Si estos juicios se alcanzan por consenso de un grupo de expertos, el resultado puede ser razonable.

En este trabajo se ha aplicado AHP para seleccionar la mejor de las opciones para el proyecto de una pasarela ciclopeatonal biapoyada de 30,00 m de longitud, una anchura de 5,00 m y 7,00 de gálibo. Para ello se ha establecido por consenso de cinco expertos una jerarquía de criterios y subcriterios así como la comparación necesaria. Los resultados indican que la opción preferida es una pasarela metálica en celosía. Sin embargo, este mejor resultado no es generalizable a cualquier situación, pues depende fuertemente del contexto y lugar elegido, así como de los criterios empleados en seleccionar a los expertos. Así, por ejemplo, si se hubiese atendido a la economía, durabilidad, facilidad constructiva y funcionalidad, la mejor alternativa hubiese sido la pasarela de vigas prefabricadas bajo losa de hormigón. Pero en este caso, la pasarela en celosía supera en valoración estética e integración en el entorno a las demás alternativas. Además, el equilibrio consensuado entre criterios y subcriterios ha decantado en este caso la solución.

6. Referencias

- Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147, 137-145.
- Crawford, G., Williams, C. (1985). A note on the analysis of subjective judgement matrices. *Journal of Mathematical Psychology*, 29, 387-405.
- Dong, Y. C., Zhang, G. Q., Hong, W. C., & Xu, Y. F. (2010). Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. *Decision Support Systems*, 49, 281-289.
- García-Segura, T., Penades-Pla, V., & Yepes, V. (2018). Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 202, 904-915.
- Moreno-Jiménez, J. M. (2002). El proceso analítico jerárquico. Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@*, 1, 21-53.
- Navarro, I. J., Penades-Pla, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R., & Yepes, V. (2020). Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26, 690-704.
- Navarro, I. J., Yepes, V., & Martí, J. V. (2019). A review of multi-criteria assessment techniques applied to sustainable infrastructures design. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 6134803.
- Navarro, I. J., Yepes, V., Martí, J. V., & Gonzalez-Vidosa, F. (2018). Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks. *Journal of Cleaner Production*, 196, 698-713.
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2010). On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45, 693-704.

- Raviv, G., Shapira, A., & Fishbain, B. (2017). AHP-based analysis of the risk potential of safety incidents: Case study of cranes in the construction industry. *Safety Science*, 91, 298-309.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill International Book Co., New York.
- Saaty, T. L. (1997). *Toma de decisiones para líderes*. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145, 85-91.
- Saaty, T. L. (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP. *Operations Research*, 61, 1101-1118.
- Sierra, L. A., Pellicer, E., & Yepes, V. (2017). Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 41-53.
- Torres-Machi, C., Carrion, A., Yepes, V., & Pellicer, E. (2013). Employability of graduate students in construction management. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 139, 163-170.
- Torres-Machi, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., & Yepes, V. (2014). An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level. *Scientific World Journal*, 2014, 524329.
- Torres-Machi, C., Chamorro, A., Yepes, V., Pellicer, E., & Videla, C. (2015). Sustainable pavement management integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making. *Transportation Research Record*, 2523, 56-63.
- Yepes, V., Pellicer, E., & Ortega, A. J. (2012). Designing a benchmark indicator for managerial competences in construction at the graduate level. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 138, 48-54.
- Yepes-Bellver, V. J. (2021). *Diseño estructural de pasarela ciclopeatonal en el Anillo Verde Metropolitano Sur de Valencia sobre la línea Valencia-Villanueva de Castellón de FGV. PK 1,5 de la carretera CV-407. TM de Valencia*. Trabajo final de grado, Universitat Politècnica de València, Valencia.
- Zyoud, S. H., & Fuchs-Hanusch, D. (2017). A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. *Expert Systems with Applications*, 78, 158-181.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

