

Estudio de soluciones mediante criterios de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida de un paso superior, tipo pérgola, de la LAV Madrid – Levante, en el término municipal de Parla (Madrid).

AUTOR: Ferrero Montes, Alejandro

TUTOR: Yepes Piqueras, Víctor

COTUTOR: Alcalá González, Julián

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado con la finalidad de finalizar los estudios para la obtención del **Grado de Ingeniería Civil**, impartido en la **Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP)**, de la *Universitat Politècnica de València*, de acuerdo con el **Real Decreto 1393/200/, del 29 de octubre**.

Dicho lo anterior, el presente TFG, titulado “Estudio de soluciones mediante criterios de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida de un paso superior, tipo pérgola, de la LAV Madrid – Levante, en el término municipal de Parla (Madrid).” se ha elaborado en su modalidad individual por el alumno **Alejandro Ferrero Montes**, dirigido por **Víctor Yepes Piqueras** como tutor y **Julián Alcalá González** como cotutor, miembros del **Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil (DICPIC)**.

Siendo finalmente entregado y expuesto, ante la Comisión Calificadora, en septiembre de 2020.

OBJETO

Considerando que el transporte constituye un principal factor en el consumo de energía y emisiones GEI, para alcanzar una sociedad sostenible se suele promover el uso de modos de transporte colectivos como el ferrocarril, pero su implementación requiere la ejecución de importantes infraestructuras.

Por ello, en el presente TFG se propone un proceso que permite reducir la participación del decisor en la toma de decisiones. En este caso, se realiza un Estudio de Soluciones para seleccionar la alternativa más sostenible para satisfacer el puente pérgola necesario para realizar el cruce de la LAV Madrid – Levante, sobre la Línea de Ferrocarril Convencional Madrid – Sevilla, que se da en el municipio de Parla (Madrid).

El proceso consta de una serie de fases. En primer lugar, se han definido las alternativas a comparar. En segundo lugar, se dimensionan las mismas, considerando todos los factores, para la obtención del volumen de materiales necesarios para ejecutar cada una de las mismas. A continuación, mediante la aplicación de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida se valoran los impactos ambientales, sociales y económicos que conllevaría el Ciclo de Vida completo de cada alternativa planteada, para finalmente mediante la técnica de evaluación multicriterio AHP, ponderar la importancia de cada criterio y subcriterio valorado, para obtener la alternativa más sostenible a satisfacer el problema.

Cabe mencionar, que el proceso seguido difiere en gran medida de los estudios de soluciones que se realizan en proyectos reales, en el sector de la construcción. Por un lado, en este caso, se están considerando los impactos acumulados de todo el Ciclo de Vida de cada estructura, así como que, la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida combinada con el AHP, permiten valorar y evaluar dichos impactos de un modo más objetivo. Por otro lado, como es bien conocido, los impactos económicos, aunque no siempre desde el punto de vista de la sostenibilidad económica, han sido evaluados, los impactos ambientales se están considerando cada vez más, mientras que la evaluación del pilar social está débilmente desarrollada.

En este estudio, viendo el aumento, por parte de las organizaciones, de la preocupación por los impactos sociales, como se puede ver en los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** del programa **Agenda 2030**. Se realiza el estudio de soluciones según los tres pilares fundamentales que conforman el desarrollo sostenible.

LOCALIZACIÓN

La infraestructura seleccionada pertenece al “Proyecto de la Plataforma para la ampliación de dos a cuatro vías en las Líneas de Alta Velocidad entre Madrid (Atocha) y Torrejón de Velasco. Tramo: Pinto – Torrejón.” Dicho proyecto comprende la plataforma ferroviaria de la LAV Madrid – Levante, del P.K. 300+000 al P.K. 306+958.97. Dicho tramo es la vía principal de la línea, que engloba una doble vía, discurriendo por dos vías únicas desde el P.K. 304+315 hasta conectar con el tramo Torrejón de Velasco.

Habiendo expuesto lo anterior, el puente, de tipología pérgola, estudiado, se sitúa en el P.K. 305+200 de dicho tramo, realizando un cruce de la LAV Madrid – Levante sobre la Línea de Ferrocarril Convencional Madrid – Sevilla, dentro del término municipal de Parla (Madrid).



Figuras 1, 2 y 3. Situación y emplazamiento puente de estudio. (Fuente. Elaboración propia en *software* AutoCAD).

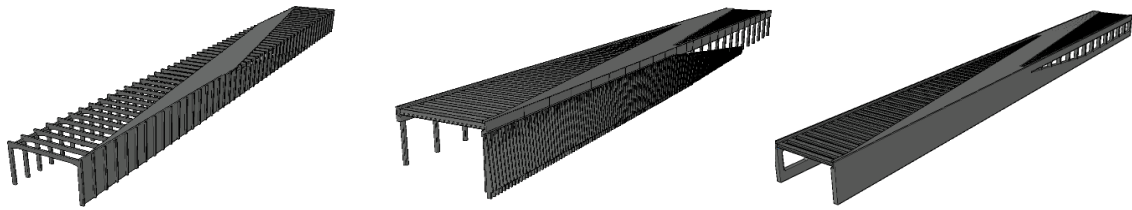
PROCESO SEGUIDO

En primer lugar, se han debido definir las alternativas a comparar en el siguiente estudio de soluciones. Debido a que el trazado ya se había definido en el Proyecto que engloba toda la línea, se definen distintas alternativas para salvar el cruce en el emplazamiento de estudio.

Dicho lo anterior, considerando las condiciones de diseño, que se dan por el fuerte esviaje con el que se da el cruce entre las líneas, se recurre a la tipología estructural de puente Pérgola. La misma, consiste en la formación de dos planos de apoyo sobre los que se forma la base de apoyo del tablero del puente. De igual modo, debido al esviaje, se deben diseñar unos muros de contención de tierras a la entrada y salida de la vía sobre la estructura de grandes dimensiones.

Habiendo descrito lo anterior, se diseñan tres alternativas estructurales de puente según la tipología Pérgola. La primera de ellas se ha concebido como una pérgola de hormigón armado, cuyos elementos estructurales son a ejecutar *in situ*, es decir, en el emplazamiento definitivo de la obra. La segunda de ellas se ha concebido como una pérgola en general de hormigón armado, con vigas doble T de hormigón pretensado, definida para que se ejecute casi en su totalidad por elementos de hormigón prefabricado. Por último, la tercera alternativa se ha concebido como una solución mixta entre las dos anteriores, diseñada de modo que

los planos de apoyo se ejecuten de hormigón armado e *in situ*, mientras que se deben disponer las mismas vigas y tablero que en la Alternativa Prefabricada.



Figuras 4, 5 y 6. Perspectivas: Alternativa In situ, Alternativa Prefabricada y Alternativa Mixta. (Fuente. Elaboración propia en *software* AutoCAD).

El siguiente paso consiste en el dimensionamiento de las tres alternativas, para determinar los volúmenes de materiales necesarios para llevarlas a la realidad, con la finalidad de utilizar dichas cantidades en el Análisis de Ciclo de Vida.

Pues bien, sabiendo con que finalidad realizamos el cálculo estructural, se ha realizado un predimensionamiento, quedándose en todo momento del lado de la seguridad, de cada elemento estructural que conforma cada alternativa comparada. Dicho cálculo se ha realizado por medio del *software* de cálculo **SAP2000 v.14.4.0**, en el cual se ha definido la geometría de cada alternativa, se han definido los estados de carga de acuerdo con la **Instrucción de Acciones a considerar en proyectos de Puentes de Ferrocarril (IAPF-07)** y se han obtenido las secciones de armadura a disponer en cada elemento, de acuerdo con la norma **UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2**, para el estado de carga más desfavorable.

Habiendo obtenido los materiales necesarios para llevar a cabo la ejecución de cada alternativa, se ha procedido con el Análisis de Ciclo de Vida.

Como ya se ha mencionado se va a realizar el Análisis de Ciclo de Vida del pilar ambiental, social y económico, pero solo existen directrices para la realización del pilar ambiental (**ISO 14040:2006** y **ISO 14044:2006**). De acuerdo con múltiples estudios, en el presente se han seguido las normas internacionales mencionadas para llevar a cabo el ACV.

Dicho lo anterior, de acuerdo con las mismas normas, se han seguido una serie de fases: Definición de objeto y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto, e interpretación de resultados.

- **Definición de objetivo y alcance.**

En la primera fase, se han definido una serie de aspectos. Primeramente, se ha considerado que el Ciclo de Vida completo de cada infraestructura va a constar de las fases de Producción, Construcción, Uso y mantenimiento (100 años de servicio), y Fin de vida. Posteriormente se ha seleccionado el *software* **OpenLCA v.1.10.2** desarrollado por **Green Delta**, para llevar a cabo el ACV Ambiental y el Social, mientras que para realizar el Análisis de Coste de Ciclo de Vida (CCV) se han utilizado hojas de cálculo de **Excel** por su menor complejidad. Además, se ha realizado el estudio según la unidad de referencia de superficie (m²) del tablero, como es habitual en el estudio de puentes.

Adicionalmente, se han debido seleccionar una serie de bases de datos para poder definir todos los procesos, como se podrá explicar y observar a continuación, siendo en el caso del ACV Ambiental la BBDD **Ecoinvent**, en el caso social **PSILCA** más el complemento **SOCA** y para el análisis de coste el **Banco de Construcción del BEDEC**. Además, al definir dichos procesos según BBDD, se difieren en menor o mayor medida de los procesos reales, por lo que, se ha debido definir el grado de incertidumbre asociado a cada uno de ellos, conformado por el factor básico más un factor asociado a la calidad de los datos de la BBDD.

- **Análisis de inventario**

La fase de Análisis de Inventario es la propia de definir los datos de entrada o *inputs* del sistema. En este caso, se definen todos los procesos asociados a cada actividad que se prevé realizar en cada fase

que completa el Ciclo de Vida de la estructura. A modo de ejemplo explicativo, en la Fase de Producción de la Alternativa Mixta se ha definido, junto a otros muchos procesos, el propio de la fabricación de las vigas doble T de fabricación en central (desde la extracción de los áridos, pasando por el encofrado, hormigonado, curado, hasta el tesado de las armaduras activas). Mientras, en la Fase de Construcción se incluye su transporte en camión especial desde la central hasta el emplazamiento, y su colocación mediante grúas autopropulsadas de 12T. A continuación, en la Fase de Uso y mantenimiento se han previsto las actividades propias de su mantenimiento para una vida de servicio de 100 años, y finalizando con la Fase de Fin de vida, se han definido los procesos asociados a su demolición y su transporte a vertedero.

Habiendo explicado lo anterior, se ha seguido el mismo proceso para cada actividad que conforma cada fase del Ciclo de Vida de cada alternativa planteada, con la finalidad última de cuantificar los impactos ambientales, sociales y económicos que conllevan. Pudiendo observar como se facilita este proceso, por su mayor objetividad, y se llegan a definir procesos que de otro modo no sería posible, como por ejemplo el consumo de CO₂ que va asociado a la carbonatación que sufre el hormigón en las fases de Uso y mantenimiento, y Fin de vida

- **Evaluación de impacto**

El paso de la evaluación de impacto es el propio que, a partir de los datos de entrada definidos en el Análisis de Inventario, proporciona los datos de salida, que sería la valoración de impactos.

Para llevar a cabo la evaluación de impactos ambientales se ha seleccionado el método **ReCipe Endpoint** que proporciona la valoración de los impactos ambientales, que todos los procesos definidos generan, en función de tres criterios: impacto a los recursos, impacto al ecosistema e impacto a la salud humana. Mientras, para la evaluación de impactos sociales, se ha seleccionado el método propio de la BBDD empleada, el **Social Impact Weighting Method** que proporciona la valoración de impactos sociales según diversos indicadores agrupados en 4 categorías principales: impacto a los trabajadores, a la comunidad local, a la sociedad y a los actores de la cadena de valor. Por último, para la valoración de los impactos al pilar económico, se ha seleccionado el método de Coste de Ciclo de Vida más bajo, mediante el cual se cuantifican todos los costes acumulados.

- **Interpretación de resultados**

Para finalizar con el Análisis de Ciclo de Vida, falta la interpretación de los resultados obtenidos de la Evaluación de Impacto. Habiendo agrupado las valoraciones de los impactos para cada alternativa, se obtiene la siguiente tabla resumen de las puntuaciones medias, asociadas a un coeficiente de variación debido al grado de incertidumbre definido anteriormente, obteniendo la puntuación y su grado de dispersión mediante la Simulación de Monte Carlo.

Código	Descripción y unidad de medida	Alternativa 1: In Situ	Alternativa 2: Prefabricada	Alternativa 3: Mixta
CE1	Coste Económico (€)	1948.724	1240.70	2358.792
CA1	Recursos (\$)	217.600	144.000	260.500
CA2	Salud Humana (DALY)	1.00E-02	6.73E-03	1.30E-02
CA3	Ecosistema (especies.año)	3.34E-05	1.96E-05	3.95E-05
CS1	Trabajadores (hora media de riesgo)	15244.835	9803.215	17633.119
CS2	Sociedad (hora media de riesgo)	42946.488	26847.537	47703.156
CS3	Comunidad Local (hora media de riesgo)	26148.191	16636.832	29955.030
CS4	Actores de la cadena de valor (hora media de riesgo)	25831.981	16419.729	29693.877
CS5	Interrupción del tráfico	0.661	0.067	0.272

Tabla 1. Cuadro resumen de las puntuaciones de impacto sin normalizar. (Fuente. Elaboración propia en *software Excel*).

Como se puede observar en la **Tabla 1**, al haber sido la Alternativa Prefabricada la que menos puntuación de impacto lleva asociado, se podría designar a priori que sería la mejor para satisfacer el

puente de estudio. Esto se debe a que, al emplear generalmente elementos estructurales prefabricados, su diseño se optimiza más en central, requiriendo de este modo una menor cantidad de volumen de materiales a utilizar. Pues, habiéndose definido en este estudio las tres alternativas a comparar en su mayoría por elementos de hormigón armado, los procesos que se han definido para cada una son similares, quedando como única variable el volumen de materiales.

Pero tratándose de un estudio de soluciones integrado en un Proyecto de construcción, no todos los criterios considerados van a tener el mismo peso en la toma de decisiones, por ello, se recurre para la valoración de pesos de los criterios y subcriterios a un método de análisis multicriterio (del grupo de análisis multiatributo), pudiendo variar finalmente la solución a adoptar.

Se ha seleccionado el método de comparación por pares **Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**, el cual disminuye el grado de subjetividad habitual en la toma de decisiones, debido a que tiene un sustento matemático y psicológico, ya que los pesos se obtienen a través de dar valores, según una escala fundamental, a una matriz de comparación por pares. Posteriormente, se verifica el índice de consistencia, que trata de disminuir al mínimo dicha subjetividad típica del proceso de toma de decisiones.

Finalmente, a través de dichas comparaciones por pares, considerando todos los aspectos asociados a cada criterio, se obtiene el vector de pesos. Normalizando las valoraciones de la **Tabla 1** y multiplicándolas por el vector de pesos, se obtienen las puntuaciones finales asociadas a cada alternativa, y siguiendo el mismo principio adoptado en todo el estudio, la alternativa que menor puntuación asociada conlleva será la más sostenible.

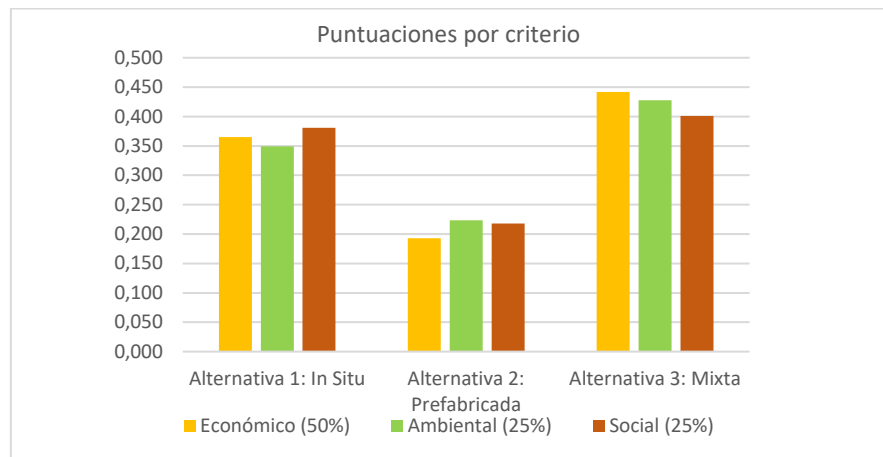


Figura 7. Puntuaciones finales por criterio. (Fuente. Elaboración propia en *software* Excel).

Finalizando, tras haber aplicado las prioridades a cada subcriterio, se obtiene que la Alternativa Prefabricada es la más sostenible para satisfacer el puente pérgola de estudio, considerando que sus elementos estructurales están más ajustados a las solicitudes, en función de los materiales a utilizar en su ejecución, y que la mejor solución ha sido diferenciar la estructura principal que resiste las cargas ferroviarias de los muros de contención, facilitando el empleo de elementos estructurales prefabricados.

CONCLUSIONES

Concluyendo, se consideran cumplidos los objetivos principales del presente estudio, tales como, determinar la solución más sostenible para satisfacer el paso superior de estudio y llevar a la práctica un método de estudio de soluciones, basado en la combinación de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida y el método multicriterio AHP, que minimiza la participación del decisor en la toma de decisiones, reduciendo así la subjetividad del proceso. Además, el proceso seguido es aplicable para llevar a cabo el estudio de soluciones de otros puentes pérgola de AVE.

Determinando que, desde el punto de vista de la sociedad, no es suficiente con promover el uso de transportes colectivos para disminuir los impactos que el transporte genera, sino que se debe considerar en todos los procesos ingenieriles asociados a todas las industrias, tales como la construcción.