

Análisis comparativo del diseño de un puente mixto mediante Eurocódigo y AASHTO LRFD

Comparative analysis of the design of a composite bridge using the Eurocode and AASHTO LRFD

F. Javier Jordán^{a,*}, Ricardo Ferraz^b y Juan A. Sobrino^c

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos, PE (Professional Engineer, Florida, USA), PEDELTA, S.L., Barcelona, España

^bIngeniero Civil, PEDELTA, S.L., Barcelona, España

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, PE (Professional Engineer, Florida, Pennsylvania, Texas, California, USA),
PEng (Professional Engineer, Ontario, Canada), PEDELTA Inc., Miami, EE. UU.

Recibido el 23 de julio de 2013; aceptado el 16 de diciembre de 2013

Resumen

En el presente artículo se comparan los criterios de proyecto de un tablero de puente mixto de hormigón y acero según las normas de proyecto europea, Eurocódigos Estructurales, y estadounidense, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Se comparan esfuerzos y tensiones calculadas según ambos Códigos de proyecto, y se presentan asimismo las verificaciones principales en las vigas mixtas longitudinales del tablero para un puente mixto de dos vanos y cuatro vigas metálicas doble T con continuidad en losa y vigas, representativo de un paso superior o viaducto de una calzada de autovía. Se presentan conclusiones generales acerca de las diferencias existentes en los requerimientos de proyecto que plantean ambas normas para las verificaciones más relevantes, obteniéndose conclusiones acerca de las cuantías de material a que conduce el proyecto según ambas normas.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Puente mixto; AASHTO LRFD; Eurocódigo 4; Análisis comparativo; Optimización

Abstract

The basic design parameters and results obtained in a composite steel and concrete bridge using Structural Eurocodes and the American Code AASHTO LRFD Bridge Design Specifications are compared in this paper. Internal efforts, stresses and the main structural verifications in composite girders are analyzed for a two span continuous composite bridge. The bridge deck is composed by four I steel girders and an upper concrete slab linked to the girders by shear stud connectors all along its length. This bridge can be considered as representative of a highway overpass or even a highway bridge. The most relevant conclusions regarding the way the analysis and verifications are treated in each code are briefly exposed in this paper as well as the main differences in the bridge design from quantities point of view.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords: Composite bridge; AASHTO LRFD; Eurocode 4; Comparative analysis; Optimisation

1. Introducción

Los Eurocódigos estructurales en general, y de forma particular su parte de puentes, y la norma estadounidense AASHTO LRFD Bridge Design Specifications son las dos normas de uso más extendido a nivel mundial para el proyecto de puentes. En el presente artículo se muestran de forma comparativa los resultados de las verificaciones estructurales recogidas en ambas

normas para un puente mixto que se puede considerar estándar y representativo de un gran número de estas estructuras.

El puente analizado es un ejemplo de lo que podría ser un paso superior sobre autopista, aunque también podría representar el puente de una de las calzadas de la propia autopista.

Se analiza un puente tipo, representativo de un gran número de puentes existentes, del que se pueden extraer una serie de conclusiones aplicables a un número significativo de puentes. Se trata de un puente mixto continuo compuesto por unas vigas metálicas doble T conectadas a una losa superior de hormigón. Se trabaja sobre un «worked example» publicado por el Steel Construction Institute [1] en el que se presentan a modo ilus-

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jjordan@pedelta.com (F.J. Jordán).

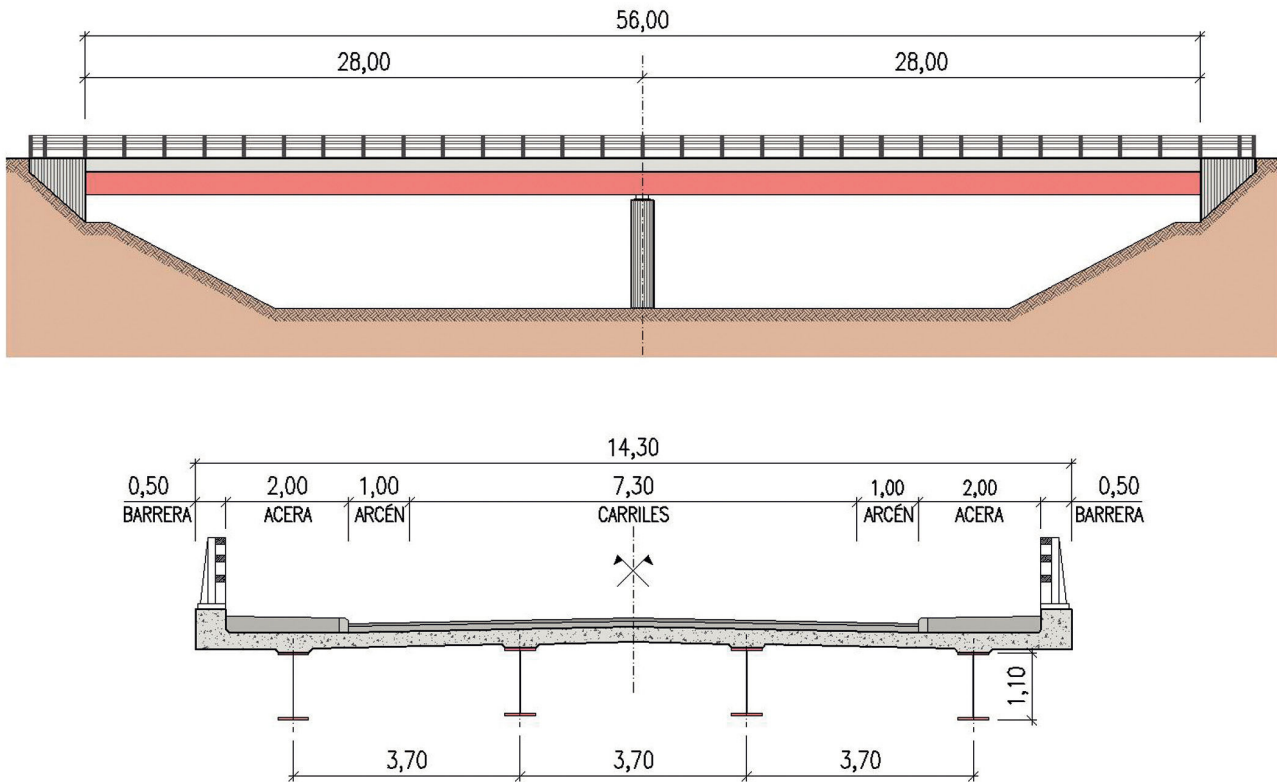


Figura 1. Alzado y sección transversal del puente analizado. Medidas en [m].

trativo los principales aspectos del proyecto de un puente de ejemplo según el Eurocódigo. La estructura no se corresponde con un puente real proyectado. Se han adoptado los valores recogidos en esta publicación [2] y se han comparado con los que se obtienen para el mismo puente verificado con la AASHTO LRFD. Se resumen más adelante los valores máximos obtenidos para los esfuerzos, a 12,40 m del estribo y sobre pila.

El puente analizado (fig. 1), es de tablero continuo de dos vanos idénticos de 28,00 m de luz. El ancho del tablero es constante de 14,30 m, con dos carriles iguales de 3,15 m de ancho, arcenes laterales de 1,00 m, dos aceras laterales de 2,00 m y barreras de contención de vehículos de 0,50 m. El tablero en planta es recto en dirección longitudinal y su esviaje es de 90°.

El tablero es mixto compuesto por una losa superior de hormigón de 0,25 m de espesor conectada a cuatro vigas longitudinales de canto constante de 1,10 m y separadas transversalmente 3,70 m entre ejes con voladizos laterales de losa de 1,60 m. No existe doble acción mixta sobre pila y los materiales seleccionados para el acero laminado y el hormigón de la losa son S355 y C45 respectivamente. La esbeltez del tablero, incluida la losa, es de alrededor de 1/20.

- La construcción es no apeada, por lo que las etapas de cálculo estructural consideradas son las siguientes:
- Fase 1: Colocación de la estructura metálica completa en todo el puente y hormigonado de la losa superior en toda su longitud.
 - Fase 2: Aplicación de las cargas muertas.
 - Fase 3: Puente en servicio.

Para las fases 2 y 3 se considera para cada esfuerzo y tensión la situación pésima a tiempo inicial y largo plazo, además de la fisuración en la losa superior en las zonas correspondientes.

En realidad en el «Worked Example» tomado como modelo para el proyecto según el Eurocódigo el proceso constructivo es ligeramente diferente, homigonándose primero un vano y posteriormente el otro. Por simplicidad se ha estudiado el hormigonado completo de la losa en una fase en todo el tablero, recalculándose los esfuerzos y tensiones correspondientes en el análisis según el Eurocódigo para esta fase de construcción.

La distribución de chapas a lo largo de las vigas longitudinales y armadura longitudinal en la losa se resume en la tabla 1 para cada vano.

Tabla 1
Dimensiones de chapas y armadura de la losa a lo largo del puente

Elemento	Estribo a 10,85 m	10,85 a 21,7 m	21,7 a 28,0 m (pila)
Ala superior	500 × 40 mm	500 × 40 mm	500 × 40 mm
Espesor alma	12 mm	10 mm	14 mm
Ala inferior	500 × 40 mm	500 × 40 mm	600 × 60 mm
Armadura superior e inferior de losa	Ø 16 mm a 0,15 m	Ø 16 mm a 0,15 m	Ø 25 mm a 0,15 m

Se disponen diafragmas transversales en forma de cruz de San Andrés con separaciones de 7,0, 7,0, 8,1 y 5,9 m sucesivamente entre los mismos avanzando desde estribo hacia pila en cada uno de sus dos vanos.

El análisis se centra en el proyecto del tablero únicamente y más concretamente en los elementos longitudinales.

2. Análisis comparativo

El objetivo del análisis comparativo es la obtención según ambas normas de los coeficientes de seguridad en Estado Límite Último y comprobaciones en ELS para el puente considerado. La geometría y materiales considerados son exactamente iguales en el análisis realizado mediante ambas normas.

En el caso de la verificación según el Eurocódigo, se adoptan los valores recogidos para el «Worked Example 1» de la publicación [1]. Para la verificación según la AASHTO LRFD se utiliza el software MDX [2], estándar en Estados Unidos para este tipo de puentes.

Se exponen en este apartado de forma resumida las comprobaciones según cada norma para cada uno de los aspectos descritos en ellas y en sus guías de aplicación o recomendaciones [3], como son: las acciones a considerar, combinaciones y coeficientes de combinación, verificaciones en Servicio y verificaciones en ELU. En este ejemplo se han considerado los ELU de rotura por flexión y cortante.

La comparación se realizará también a nivel de esfuerzos y tensiones obtenidas mediante los cálculos prescritos en ambas normas.

2.1. Acciones a considerar

Las cargas permanentes se calculan de modo similar en ambos casos a partir de la geometría de las secciones y pesos propios de los materiales.

Las mayores diferencias a nivel de cargas a considerar definidas en ambas normas se encuentran en la definición de las cargas de tráfico, aunque en realidad no son directamente comparables debido a las particularidades de la carga AASHTO y a los diferentes coeficientes de combinación utilizados en la norma.

En ambas normas se parte de la definición del número de carriles de diseño, que en el caso de la norma americana se calcula a partir del ancho de plataforma, carriles y arceles, dividido entre 3,65 m, mientras que en el Eurocódigo se divide este ancho entre 3,00 m para calcular el número de carriles.

En lo referente a las cargas puntuales de tráfico, en este puente la carga del camión por carril según la AASHTO LRFD es de 325 kN, que incrementada por el coeficiente de impacto de valor 1,33 pasa a ser de 433 kN por carril y de 866 kN en el total de los dos carriles. Esta carga se debe afectar del coeficiente de simultaneidad, que para tres carriles cargados (la AASHTO considera las aceras como un carril adicional), es de 0,85. Así pues, la carga de camiones resultante es según la AASHTO de valor 734,83 kN. Para flexión negativa se debe considerar otro valor de la carga de camión y vehículos adicionales, que aproximadamente vienen a ser equivalentes a un total de 1.275 kN correspondiente a cuatro camiones con coeficiente adicional de configuración de valor 0,90.

En el caso del Eurocódigo, con 9,30 m de ancho de plataforma se deben considerar 3 carriles, siendo en ese caso las cargas puntuales totales de 600 kN para el primer carril, 400 kN para el segundo y 200 kN para el tercero, incluyendo ya los coeficientes de impacto y simultaneidad en estos valores. Así pues, el valor total de la carga de camiones según el Eurocódigo es en este ejemplo de 1.200 kN, comparable al valor de 1.275 kN obtenido según la AASHTO LRFD para flexión negativa pero sensiblemente superior al considerado por la norma americana para flexión positiva según lo expuesto en la tabla 2.

La sobrecarga uniforme según la AASHTO LRFD es de 9,5 kN/m por carril. En las aceras se aplica un valor para la sobrecarga de 3,2 kN/m² para aceras no mayores a 2,0 m, que es el caso. Así pues, para tres carriles con factor de simultaneidad de valor 0,85 para este número de carriles, la sobrecarga uniforme total por metro de tablero es de 27 kN/m.

Según el Eurocódigo con 3 carriles, la sobrecarga uniforme a considerar en los carriles es de 9,5 kN/m² en el carril pésimo de 3,0 m de ancho y 2,5 kN/m² en el resto de la plataforma. En las aceras se debe considerar una sobrecarga de 3 kN/m² concomitante a la de los vehículos. Así pues la sobrecarga uniforme total por metro de tablero es de 54,75 kN/m, más del doble que la considerada según la AASHTO LRFD según se puede ver en la tabla 3.

Tabla 2

Comparación de los valores de la sobrecarga puntual de camiones según la AASHTO LRFD y el Eurocódigo

Valor de la sobrecarga puntual según la AASHTO LRFD para flexión positiva					
	Sobrecarga uniforme	Valor	Coeficiente de impacto	Coeficiente de simultaneidad	Valor total [kN]
Carriles	Carril 1 [kN]	325	1,33	0,85	367,41
	Carril 2 [kN]	325	1,33	0,85	367,41
					734,83
Valor de la sobrecarga puntual según Eurocódigo para flexión positiva					
	Sobrecarga uniforme	Valor			
Carriles	Carril 1 [kN]	600			
	Carril 2 [kN]	400			
	Carril 3 [kN]	200			
		1.200			

Tabla 3

Comparación de los valores de la sobrecarga repartida según la AASHTO LRFD y el Eurocódigo

Valores de la sobrecarga repartida según la AASHTO LRFD					
	Sobrecarga uniforme	Valor	Coefficiente de impacto	Coefficiente de simultaneidad	Valor total [kN/m]
Carriles	Carril 1 [kN/m]	9,5	1,00	0,85	8,075
	Carril 2 [kN/m]	9,5	1,00	0,85	8,075
Aceras	Sobrecarga [kN/m ²]	3,2	1,00	0,85	10,88
	Ancho [m]	4,00			
	Carga [kN/m]	12,8			
	TOTAL				27,03
Valores de la sobrecarga repartida según Eurocódigo					
	Sobrecarga uniforme	Valor [kN/m ²]	Ancho [m]	Valor total [kN/m]	
Carriles	Carril 1 [kN/m]	9,0	3,00	27,00	
	Carril 2 [kN/m]	2,5	3,15	7,88	
	Carril 3 [kN/m]	2,5	3,15	7,88	
Aceras	Sobrecarga [kN/m ²]	3,0	4,0	12,00	
	TOTAL			54,75	

No se han considerado en este análisis comparativo las acciones climáticas, particularmente la acción térmica, con tratamiento muy similar en ambas normas.

Los efectos de la fluencia se tratan de modo muy similar en ambas normas, en base a un módulo de elasticidad equivalente para cargas permanentes a largo plazo, aunque la AASHTO LRFD propone unos valores aproximados para cada tipo de hormigón que simplifican el cálculo y aportan suficiente precisión al método de cálculo simplificado. En el Eurocódigo se explicitan reglas detalladas para la consideración de la retracción, tanto en lo referente a su efecto primario como secundario, mientras que esta acción no se recoge en la AASHTO LRFD.

2.2. Combinación de las acciones

Las reglas de combinación de acciones en ambos códigos son también diferentes. la AASHTO define una combinación específica para verificaciones tensionales en servicio en los elementos metálicos, la combinación Servicio II, así como otra para control de fisuración en elementos de hormigón armado, la denominada Servicio I.

Para la evaluación de los Estados Límite Últimos, la AASHTO LRFD define diferentes combinaciones Resistencia I a V para diferentes hipótesis de tipo de carga predominante. Básicamente, para cargas gravitatorias y tráfico predominante, se mayoran las cargas permanentes por los coeficientes de valor 1,25 y 1,50 para peso propio y elementos no estructurales respectivamente, y por el coeficiente 1,75 para la sobrecarga de tráfico.

El número de combinaciones en el Eurocódigo es más amplio pero básicamente para tráfico predominante se afecta en ELU al valor de las cargas permanentes por los coeficientes 1,35 y 1,20 para peso propio y elementos no estructurales respectivamente, y por el coeficiente 1,35 para la sobrecarga de tráfico.

Se puede concluir de lo anteriormente expuesto que los valores de referencia de las cargas no deben ser comparados directamente en ambas normas puesto que son afectados por

coeficientes de mayoración distintos en ELU e incluso en servicio.

2.3. Características de los modelos de cálculo

En ambos casos, ambas normas recogen unas reglas generales muy similares para los modelos de análisis del puente. Para la realización del cálculo simplificado de esfuerzos, en el Eurocódigo se debe considerar una zona fisurada de la losa en flexión negativa en la que solo se cuente con la colaboración de la armadura traccionada en la losa, aunque también propone, si se pretende realizar un cálculo de esfuerzos más refinado, el uso de formulaciones más refinadas para valorar el efecto de tensión stiffening. En todo caso, el Eurocódigo obliga a calcular los rasantes en la conexión entre vigas metálicas y elementos de hormigón con las propiedades brutas de la sección a pesar de que los esfuerzos en el modelo global de cálculo se calculan con la sección fisurada considerando únicamente la armadura a efectos de cálculo de las propiedades mecánicas de la losa.

En la AASHTO LRFD se propone un proceso iterativo, calculando en primer lugar con inercias brutas con losa sin fisurar, y considerando en segunda iteración con losa fisurada y colaboración tan solo de la armadura traccionada en aquellas zonas en las que se obtenga una tracción mayor al doble de la resistencia a tracción del hormigón.

En ambos casos de cálculo según el Eurocódigo y según la AASHTO LRFD en el modelo de cálculo utilizado en este análisis se representa la losa superior mediante elementos tipo lámina, mientras que las vigas metálicas se representan como elementos viga. En el modelo de cálculo se incluyen los arriostros transversales verticales de rigidización también en ambos casos, aunque la AASHTO LRFD posibilita un reparto simplificado de cargas a las vigas siempre que se cumplan ciertos requerimientos geométricos, lo cual facilita el cálculo en casos sencillos, que son los más habituales. El Eurocódigo no proporciona expresiones para este cálculo simplificado de tableros de vigas como vigas continuas con coeficientes de reparto para cada una de ellas.

2.4. Resultados: tensiones y esfuerzos

Se presentan en las tablas 4 a 6 los resultados de esfuerzos en las secciones más solicitadas para las combinaciones de servicio en el acero y en el hormigón calculadas según ambas normas.

Tal y como se puede observar, los valores de los esfuerzos obtenidos según el Eurocódigo son algo inferiores tanto en ELS como en ELU a los obtenidos según la AASHTO LRFD. Hay que hacer notar que según la AASHTO la configuración de camiones varía según el tipo de esfuerzo a calcular, existiendo vehículos adicionales según una cierta configuración para el cálculo de los fletores sobre pilas, por ejemplo, caso

Tabla 4
Comparación de fletores en la sección sobre pila

	Flector sobre pila, [kN*m]				
	Fase 1	Fase 2	Sobrecargas	ELS	ELU
Eurocódigo	-2.378	-1.818	-2.682	-6.878	-9.013
AASHTO LRFD	-2.378	-1.818	-2.683	-6.879	-9.443
% EC respecto a AASHTO				100%	95%

Tabla 5
Comparación de fletores en la sección de máximo flector positivo

	Flector a 12,4 m de estribo, [kN*m]				
	Fase 1	Fase 2	Sobrecargas	ELS	ELU
Eurocódigo	1.150	842	1.524	3.516	4.620
AASHTO LRFD	1.150	842	2.111	4.103	5.753
% EC respecto a AASHTO				86%	80%

Tabla 6
Comparación de cortantes en la sección sobre pila

	Cortante sobre pila, [kN]				
	Fase 1	Fase 2	Sobrecargas	ELS	ELU
Eurocódigo	398	298	1.098	1.098	1.482
AASHTO LRFD	398	298	628	1.324	1.850
% EC respecto a AASHTO				83%	80%

Tabla 7
Comparación de tensiones en la sección sobre pila

	Compresiones en ala inferior sobre pila, [MPa]				Tensión admisible, fadm	% respecto a fadm	Factor de seguridad
	Fase 1	Fase 2	Sobrecargas	ELS			
Eurocódigo	-65	-38	-59	-162	-335	48%	2,07
AASHTO LRFD	-65	-38	-53	-172	-301,5	57%	1,75
% EC respecto a AASHTO				94%		85%	

Tabla 8
Comparación de tensiones en la sección de máxima flexión positiva

	Tracciones en ala inferior a 12,4 m de estribo, [MPa]				Tensión admisible, fadm	% respecto a fadm	Factor de seguridad
	Fase 1	Fase 2	Sobrecargas	ELS			
Eurocódigo	50	29	50	129	355	36%	2,74
AASHTO LRFD	50	29	71	171	319,5	54%	1,87
% EC respecto a AASHTO				76%		68%	

en el que el flector en servicio calculado según ambas normas coincide.

De todos modos, en estos valores no se han considerado en el caso del Eurocódigo los efectos primarios y secundarios de la retracción, que dependiendo de la sección pueden suponer entre un 10% y un 15% de incremento de esfuerzos en servicio y que harían que los esfuerzos fuesen más cercanos a los calculados según la AASHTO LRFD, donde no está recogida esta acción.

En lo referente a tensiones normales longitudinales, se muestra en las tablas 7 y 8 una comparación para las fibras críticas de las secciones más solicitadas.

Hay que señalar que para la combinación en ELS, la AASHTO mayoraría las tensiones debidas a las sobrecargas con un factor de 1,30. Al igual que en esfuerzos, las tensiones calculadas según el Eurocódigo son entre un 5% y un 25% menores que las calculadas según la AASHTO.

2.5. Verificaciones de los elementos metálicos en ELS

En ambas normas la verificación tensional en ELS se basa en verificar que las tensiones son inferiores a un valor admisible, que es el 95% del límite elástico en el caso de la AASHTO LRFD con la sobrecarga mayorada por 1,30, y del límite elástico en el caso del Eurocódigo. De nuevo se hace patente la diferencia entre ambas normas a la hora de aplicar los coeficientes de seguridad a esfuerzos y resistencias, lo cual hace que la comparación entre ambas normas sea más realista desde el punto de vista del valor del cociente entre el valor solicitante y el valor resistente o admisible.

Así pues, el cociente entre tensión calculada y tensión admisible se ve incrementado cuando se realiza la comparación según la AASHTO, dado que la tensión admisible es menor en esta norma. Adicionalmente, las tensiones de cálculo son mayores según la AASHTO, con lo cual esta comprobación según la AASHTO LRFD es claramente más crítica que según el Eurocódigo según se puede observar en la columna de la derecha de las tablas 7 y 8 donde se observa que este cociente entre tensión de cálculo y tensión admisible según el Eurocódigo es del orden de un 68% a un 85% al obtenido según la norma americana.

2.6. Verificaciones de la losa de hormigón en ELS

Ambas normas establecen unos límites para la compresión máxima en el hormigón y tracción máxima en las armaduras de la losa. Sin embargo, estas limitaciones no acostumbran a ser críticas y no lo son en este caso en particular.

En el caso de la norma americana incluso en su articulado se recomienda la construcción sin apear, con la estructura metálica resistiendo en su totalidad el peso del hormigón fresco. Esto hace que la losa de hormigón y su armadura traccionada no se encuentren sometidas a niveles de tensiones elevados en servicio. Es habitual que en los puentes dimensionados según la AASHTO LRFD la armadura longitudinal de la losa sobre pilas sea la mínima recomendada por la norma y no sea determinada por condiciones de cálculo resistente o en servicio.

2.7. Verificaciones en ELU de flexión y cortante en las vigas mixtas

Se resumen en la tabla 9 los coeficientes de seguridad a rotura a cortante y flexión en las secciones más solicitadas. Hay que señalar que en la verificación a cortante se ha considerado la existencia de tres rigidizadores verticales de alma equidistantes entre diafragmas mientras que se ha considerado que no existen rigidizadores longitudinales de alma.

Comparando los valores de estos coeficientes de seguridad con los presentados en las tablas 7 y 8 para ELS, se puede observar que en general sus valores son menores para ambas normas en ELU, siendo esta por lo tanto la comprobación crítica excepto para la sección de flexión positiva con la AASHTO LRFD.

También se puede apreciar que con el Eurocódigo se obtienen coeficientes de seguridad más elevados que con la AASHTO LRFD en flexión negativa, siendo esta diferencia del orden del 30%. En flexión positiva ocurre lo contrario aunque en menor porcentaje.

Así pues, el proyecto según el Eurocódigo conduciría según lo anterior a una menor cantidad de materiales en el puente.

Hay que señalar que los límites en la esbeltez máxima de almas para prevenir problemas de abolladura en la misma son bastante diferentes en ambas normas. En el Eurocódigo se permite, sin verificaciones adicionales, diseñar un alma o subpanel no rigidizado con una esbeltez de 1/300 respecto a su canto. En la AASHTO LRFD el mismo límite es exactamente de la mitad, 1/150, siendo de valor 1/300 para la altura total de un alma con rigidizadores longitudinales.

2.8. Verificación de la conexión

Para el diseño de la conexión entre hormigón y acero en la sección mixta, ambas normas incluyen una verificación que resulta a menudo crítica y que es la derivada de la resistencia a fatiga del perno embebido en el hormigón. En el caso de la AASHTO LRFD la solicitación para esta verificación se formula en base al rasante provocado por las cargas de tráfico, mientras que en el caso del Eurocódigo se calcula en base al rasante máximo para la combinación de acciones características en servicio.

Hay que señalar que este valor máximo del rasante por perno en servicio se limita en el Eurocódigo en general al 75% del valor resistente en ELU, aunque algunos países como Francia lo limitan a un valor inferior en sus Documentos Nacionales de Aplicación. En todo caso esta condición es determinante en el diseño de los pernos conectadores y no está en la línea del dimensionamiento en ELU con redistribución de rasantes que se acostumbra a realizar en España.

Hay una diferencia notable entre el Eurocódigo y la AASHTO LRFD en este aspecto. En el Eurocódigo se establece que para el cálculo de los conectadores en la zona sometida a flexión negativa, el cálculo de rasantes se debe realizar considerando las propiedades mecánicas de la sección con losa sin fisurar, aunque para el cálculo de tensiones y esfuerzos se considere la losa fisurada. Es cierto que permite en el caso de realizarse un cálculo considerando tension stiffening en la losa utilizar esas características mecánicas en consonancia con este análisis, pero esto obliga a un cálculo más sofisticado e iterativo.

Según lo especificado anteriormente, la distribución de pernos en un cálculo estándar según el Eurocódigo es prácticamente lineal entre las secciones cercanas a pilas y centro vano. Tampoco se permiten apenas redistribuciones de esfuerzos rasantes en la conexión en ELU, estando permitido superarse localmente en un 10% el valor del rasante resistente local.

El Eurocódigo adicionalmente obliga a un refinamiento en la distribución de conectadores en la zona máxima flexión positiva, obligando a disponer los mismos según una distribución plástica de rasantes en caso de que en la sección de máximo momento positivo el momento solicitante supere el momento elástico de la sección. Esto obliga a disponer más conectadores en esta zona que los correspondientes a una distribución elástica.

La situación es diferente en la AASHTO LRFD, pues a pesar de incorporar la verificación a fatiga en el perno embebido, permite considerar las propiedades de la sección fisurada sin colaboración del hormigón a efectos del cálculo del rasante a nivel sección, cosa que hace que en esta zona del puente los rasantes en esa conexión se reduzcan considerablemente y esta deje de ser una verificación crítica. Adicionalmente esta norma sí que permite reconsiderar en ELU una redistribución total de rasantes entre las secciones críticas de máximo y mínimo momento flector.

Particularizando este aspecto al puente analizado, según el Eurocódigo es necesario disponer 3 filas de pernos conectadores de 19 mm cada 150 mm cerca de pila según esta limitación

Tabla 9
Coeficientes de seguridad a rotura en las secciones más solicitadas

	Coeficientes de seguridad a rotura, ELU		
	Eurocódigo	AASHTO LRFD	% EC / AASHTO
Flector a 12.4 m de estribo	2,03	2,20	92%
Flector sobre pila	1,83	1,53	120%
Cortante sobre pila	1,71	1,30	132%

a fatiga, mientras que según la AASHTO LRFD para cumplir los requerimientos de fatiga tan solo es necesario disponer los mismos pernos separados no más de 378 mm, una separación dos veces mayor que la requerida por el Eurocódigo.

Este hecho no es de importancia económica relevante, pues los pernos conectadores son un elemento con poco peso en el total del coste del puente, pero sí que puede ser de importancia en el propio diseño, al provocar unas congestiones de elementos de conexión que pueden dificultar la ejecución de estas zonas del puente en muchos casos o complicar en gran medida su diseño. Un ejemplo claro lo constituyen los puentes con losa prefabricada y alveolos en los que se alojan los pernos.

2.9. Verificaciones a fatiga

La verificación a fatiga en ambas normas se realiza de forma similar, aunque la carga a considerar en ambos casos y el modo de amplificar el rango de tensiones difiere. En el Eurocódigo el cálculo es más sofisticado e intervienen más parámetros, dependiendo de las características geométricas del puente, la sección a verificar, la intensidad de tráfico prevista, la vida útil de proyecto y la influencia de los carriles secundarios en el elemento considerado. La clasificación de los detalles y sus tensiones límite es similar en ambas normas, aunque en el Eurocódigo se asocia la comprobación a una vida útil del puente de 125 años, mientras que en la AASHTO esta es de 75 años por defecto, aunque está formulada la comprobación para otros periodos. En la AASHTO se modifica la tensión de cálculo en función del número medio de vehículos pesados diarios.

Se presentan en la tabla 10 los valores de comprobación obtenidos según ambas normas para las alas traccionadas en las secciones más solicitadas. Se aprecia que el Eurocódigo penaliza más la verificación a fatiga. En las secciones sometidas a flexión negativa la AASHTO LRFD impone un cálculo de tensiones en base a las propiedades de la losa sin fisurar, lo cual es también menos crítico que lo impuesto por el Eurocódigo. La verificación según la AASHTO LRFD se ha realizado para una intensidad media diaria de 4 000 vehículos pesados por carril.

En general se puede decir que la verificación según el Eurocódigo es más sofisticada y algo más conservadora.

3. Cuantificación del diseño

En el ejemplo expuesto, con geometría y propiedades de las secciones predefinidas según [1], la cuantía de acero en chapas en vigas longitudinales incluyendo su rigidización es de unos 180 kg/m². Este valor es algo elevado para este tipo de tablero

de puente de carretera como efectivamente muestran los coeficientes de seguridad obtenidos según la verificación con ambas normas. En realidad no se trata de un proyecto real de un puente optimizado sino de un ejemplo de cálculo que lo que pretende es ilustrar el análisis y verificaciones recogidas en los Eurocódigos Estructurales, especialmente en el Eurocódigo 4 parte 2 [4], referente a puentes mixtos.

Como ejercicio adicional se ha realizado un dimensionamiento optimizado del puente según la norma AASHTO LRFD, zonificando el alma en cuatro zonas en cada vano y las alas únicamente en dos zonas, de la manera en la que habitualmente se proyecta este tipo de puentes en Norteamérica, con uniones atornilladas de las vigas metálicas a quintos de la luz aproximadamente. La cuantía obtenida de este modo para las vigas y su rigidización ha sido de unos 140 kg/m², valor este que se sitúa en el rango de valores correspondientes a un proyecto de puente real.

Se ha realizado este mismo proceso de optimización mediante el código OM3 de SETRA, obteniéndose una cuantía de 125 kg/m², valor algo inferior al obtenido para el caso de dimensionamiento según la AASHTO LRFD.

Cabe señalar que en un proceso de optimización de un puente mixto, la cantidad de material en chapas es tan solo uno de los parámetros de optimización, siendo el otro el coste unitario de ese material. Los numerosos estudios realizados al respecto indican que en general el coste del material para vigas doble T se sitúa en el entorno de los 2,00 a 2,50 €/kg de acero. Este valor es sensiblemente inferior al que se acostumbra a considerar en el caso de secciones cajón anchas, no transportables en una sola pieza a obra, y con abundante rigidización, y que a menudo se sitúa en el entorno de los 2,50 a 3,00 €/kg. De este modo el coste total de una solución con vigas doble T normalmente resulta inferior al coste de una sección con vigas artesa.

4. Resumen y conclusiones

Se han comparado esfuerzos, tensiones y las principales verificaciones en ELS y ELU en un puente mixto continuo de dos vanos y cuatro vigas doble T metálicas según el Eurocódigo 4 parte 2 y según la AASHTO LRFD. Ambas normas utilizan una filosofía muy similar para la definición de acciones, particularmente definiendo carriles de circulación y el valor de las cargas de tráfico dependiendo del número de carriles. En general el Eurocódigo considera unos valores más elevados para el valor característico de las cargas de tráfico pero unos valores más reducidos para los coeficientes de combinación y ponderación respecto a la AASHTO LRFD. En lo referente a los modelos de cálculo, ambas normas utilizan una metodología

Tabla 10
Comparación de la verificación a fatiga en las alas traccionadas de las vigas longitudinales

Sección	Eurocódigo, [MPa]			AASHTO LRFD 125 años, [MPa]		
	Admisible	Solicitante	Solicitante/Admisible	Admisible	Solicitante	Solicitante/Admisible
A 12.4 m de estribo	59	38	0,65	70	40	0,57
Sobre pila	54	9	0,17	58	2	0,03

similar, recomendando para el análisis estándar el uso del módulo de equivalencia ajustado para el hormigón y fisuración en la losa de hormigón traccionada, aunque el Eurocódigo alternatively permite considerar el efecto de tension stiffening. Se ha constatado que para el ejemplo considerado el Eurocódigo es menos conservador que la AASHTO LRFD, del orden de un 10% a un 30% dependiendo de la verificación en cuestión, conduciendo por lo tanto a proyectos algo más económicos para este tipo de puentes.

Bibliografía

- [1] Iles D. Composite highway bridge design: Worked examples (with corrigendum, January 2013). Berkshire: The Steel Construction Institute; 2013.
- [2] Curved & straight steel bridge design & rating manual version 6.5. MDX, USA; 2009.
- [3] Guidelines for steel girder bridge analysis. 1.^a ed. USA: AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration; 2009.
- [4] EN 1994-2:2005 (y sucesivos corrigendum). Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures – Part 2: General rules and rules for bridges. Brussels: CEN; 2008.