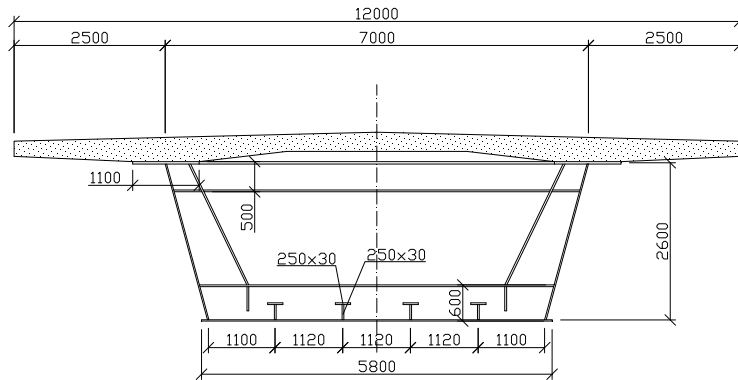


España y los Eurocódigos: La necesidad de converger

Alejandro Pérez Caldentey
Hugo Corres Peiretti
Fabio Pirani
Felice Mimi
Ales Mensik



RESUMEN

España, al igual que el resto de Europa, se encuentra ante un gran reto con la implantación progresiva de la versión definitiva de los Eurocódigos. Paradójicamente, la históricamente *euroentusiasta* España se encuentra hoy por hoy a la cola de los países europeos en lo referente a su entusiasmo por los Eurocódigos. Mientras en muchos de los países de nuestro entorno se abandonarán completamente las normas nacionales, a pesar del euroescepticismo de algunos (vease Reino Unido), España seguirá produciéndolas. Además de las razones políticas y estratégicas claras para que España apueste decididamente por la implantación de los Eurocódigos, en este trabajo se presentan razones técnicas basadas en un estudio comparativo del diseño resultante de varias estructuras, de diversa tipología, diseñadas con la IAP/EHE/RPX y con los Eurocódigos.

1. INTRODUCCIÓN

Existen muchas razones de índole práctica que apuntan a la conveniencia de converger con Europa también en las reglas del diseño estructural. Estas son las razones que han impulsado a nivel internacional un proyecto de más de veinte años de duración y que ha culminado en la versión EN de los Eurocódigos. Todos aquellos países miembros del CEN (Comité Europeo de Normalización) cuyas normas sean normas EN (normas UNE en España) deberán derogar sus normas nacionales en el año 2010 mientras que en aquellos países en que la normativa no tenga el carácter EN los Eurocódigos serán una alternativa válida a las normas

España y los Eurocódigos: La necesidad de converger

nacionales. España se encuentra en este segundo grupo, mientras que Inglaterra, Francia, Alemania o Austria se encuentran en el primer grupo, destacando que éste último país adelantará la derogación de sus normas nacionales a 2009.

Es indudable que el uso de un sistema de reglas común facilitará la movilidad de personas y empresas en el ámbito europeo e incrementará la influencia de Europa en el ámbito internacional.

España ha decidido mantener su normativa propia y ha desarrollado recientemente una nueva versión de la EHE, el Código Técnico, la EAE, la IAPF y está revisando la IAP. Los principales argumentos para mantener una normativa propia son los siguientes:

- Los Eurocódigos con complejos y a veces inconsistentes por la participación de grupos de personas distintas en el desarrollo de las distintas partes, por ejemplo en los Eurocódigos dedicados a la edificación o a los puentes.
- Cambiar supone un coste y un riesgo. Parece lógico cambiar solamente en aquello en que se tenga razones claras que justifiquen el cambio. Estos argumentos pueden, sin embargo, discutirse:
- La normativa nacional también puede ser inconsistente y también incluye modelos de cálculo de gran complejidad que no aparecen como tales solamente en la medida en que están asumidos por la comunidad técnica. Esta complejidad va en aumento y basta, como ejemplo, recordar los cambios introducidos en los coeficientes de mayoración y los coeficientes de combinación frente al coeficiente de mayoración único para todas las cargas que se usaba antiguamente.
- La práctica de cambiar en las sucesivas revisiones solo aquellos apartados de las normas en los cuales los comités nacionales vean razones para modificarlos ha llevado a que nuestras normas sean una amalgama de modelos generalmente tomados de distintas fuentes entre ellas el ACI, el código Modelo del 1978 o versiones anteriores ENV de los Eurocódigos, sin una consistencia global.
- El argumento del coste que supone el cambio es sin duda un argumento de caldado, puesto que resulta necesario modificar el software e invertir

España y los Eurocódigos: La necesidad de converger

fuertemente en formación del personal técnico. Sin embargo, también se puede argumentar que resulta más caro mantener un sistema de normas paralelas donde todo el sistema debe estar preparado para ser diseñado según cualquiera de los dos sistemas de normas. También se puede argumentar que algunos cambios de la normativa nacional también han generado costes importantes.

- En términos de educación, no existe tiempo material para enseñar dos normas paralelas, de tal forma que los jóvenes ingenieros españoles partirán con desventaja respecto de sus competidores europeos.

Otra razón de la resistencia que genera en España la idea de abandonar la normativa propia es la incertidumbre ante el impacto que tendrá la aplicación de los Eurocódigos en el coste y el diseño de las estructuras. En este sentido, este trabajo pretende aportar información mediante el análisis de una serie de estructuras tipo de aplicación frecuente en la ingeniería española.

Las estructuras seleccionadas han sido proyectadas de forma paralela adoptando la normativa española por un lado y la normativa europea por otro.

Es importante, con objeto de llegar a una conclusión adecuada, el llevar el diseño hasta sus últimas consecuencias puesto que la aplicación de los eurocódigos supone, respecto de la normativa española, cambios, tanto en las cargas a considerar, como en los coeficientes de mayoración de estas cargas, como en los coeficientes de combinación de las mismas, como en los valores admisibles en servicio, siendo lo importante el resultado global.

Debido a la amplitud del problema y la limitación de espacio, este trabajo se centrará en la influencia de las cargas gravitatorias.

2. LA SOBRECARGA DE USO EN PUENTES DE CARRETERA DEL EUROCÓDIGO

Uno de los cambios más importantes que introduce el Eurocódigo de acciones EN-1991 corresponde al modelo de sobrecargas a utilizar. Este modelo es mucho más complejo que el de la actual IAP puesto que supone subdividir la calzada en carriles con distintos valores de sobrecarga

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

repartida (9 kN/m^2 en el carril más desfavorable y 2.5 kN/m^2 en el resto de la calzada), y aplicar un vehículo pesado en cada carril (ver figura 1). Se trata de un modelo claramente más desfavorable para el caso de puentes estrechos o moderadamente estrechos (6 a 12.00 metros).

Por otra parte, a efectos locales, la configuración del tándem del Eurocódigo, que supone concentrar 600 kN en un ancho entre ejes de 1.25 m , resulta claramente más desfavorable que el carro de la actual IAP que se distribuye en 6 cargas con una longitud de 3.00 metros.

En el sentido contrario sin embargo, hay que destacar que, según el EN1991, en Estado Límite Último la sobrecarga de tráfico se mayor a por 1.35 en lugar de 1.50 .

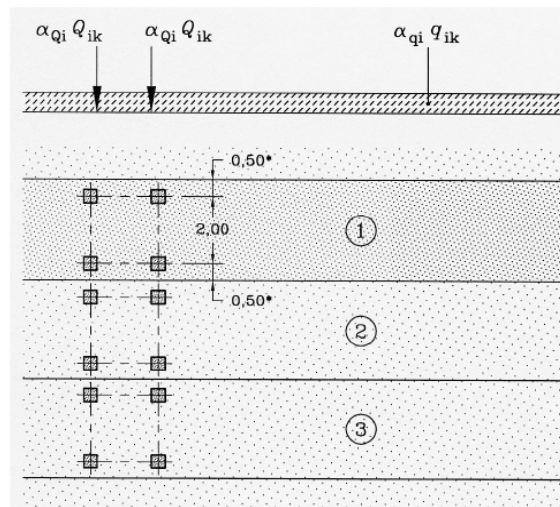


Figura 1. Sobrecarga de tráfico propuesta para puentes de carretera por EN 1991

3. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Para obtener una visión razonablemente amplia del problema, se han analizado las siguientes estructuras:

- Un paso superior de hormigón pretensado de 12.00 metros de luz y 3 vanos de 25.6 - 32.00 - 25.6 m .
- Un puente de vigas de 12.00 metros de ancho y 4 vanos con luces de 15.0 , 21.8 , 15.0 y 15.0 metros. El tablero está compuesto por vigas en I de 1.00 metro de canto con una losa de 0.25 m de espesor. Debido a la diferencia de luces y con objeto de mantener el canto de la estructura, el número de vigas varía siendo igual a 5 en los vanos cortos e igual a 10 en el vano largo (ver Figura 2).

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

- Varios marcos de hormigón armado en los cuales se hicieron variar las características de acuerdo con los siguientes criterios:
 - ... Luz de 7.00 o 12.00 metros
 - ... Sin tierras y con 2.50 metros de tierra
 - ... Condiciones de cimentación buenas y malas

Para definir estas estructuras se partió de las proporciones de una estructura real cuyas propiedades se detallan en la figura 3.

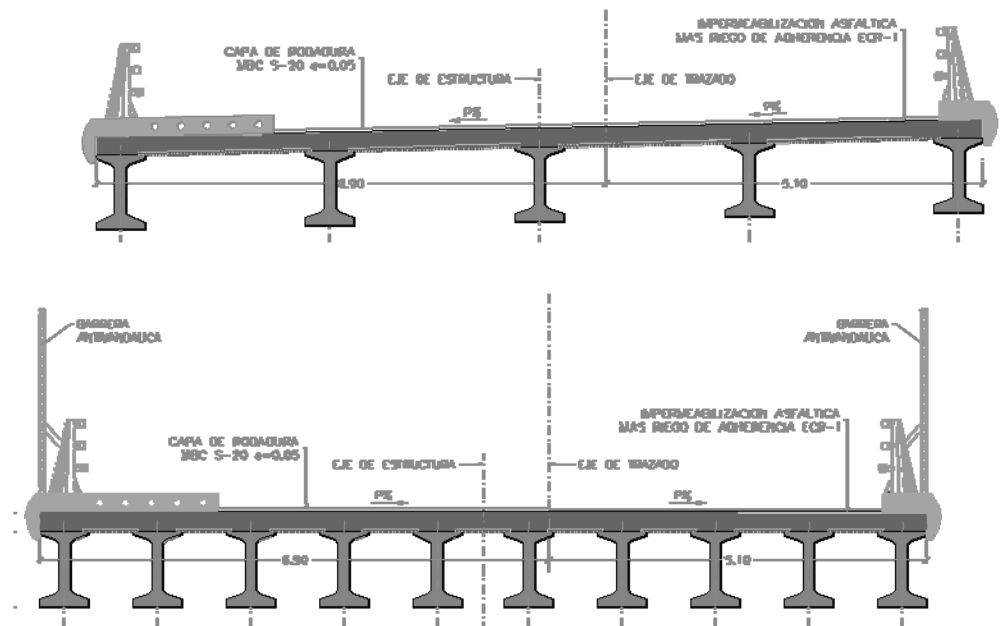


Figura 2. Secciones transversales de los vanos laterales (sup) y centrales (inf) de las estructuras analizadas.

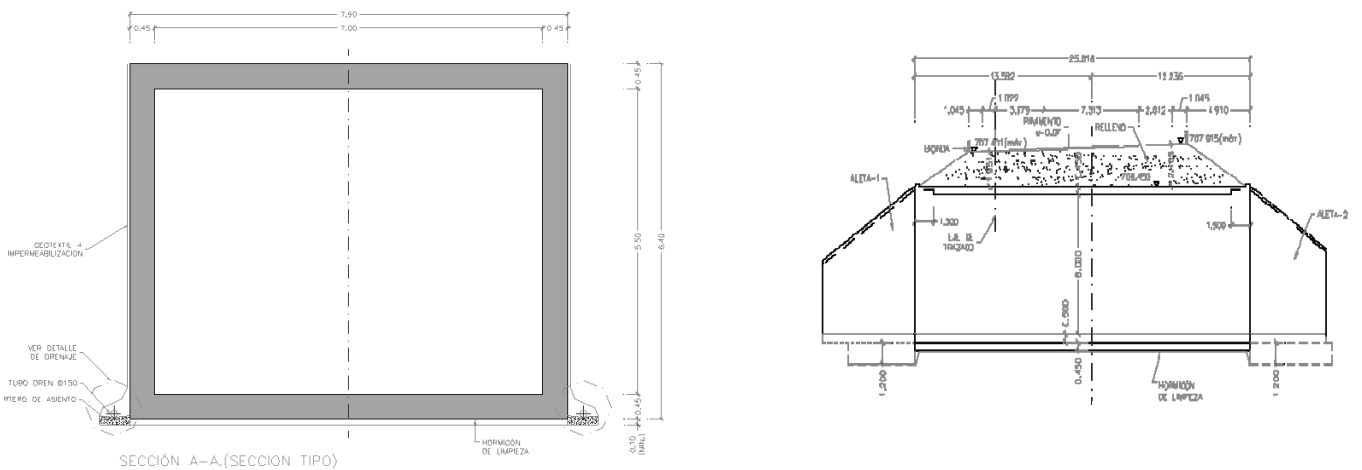
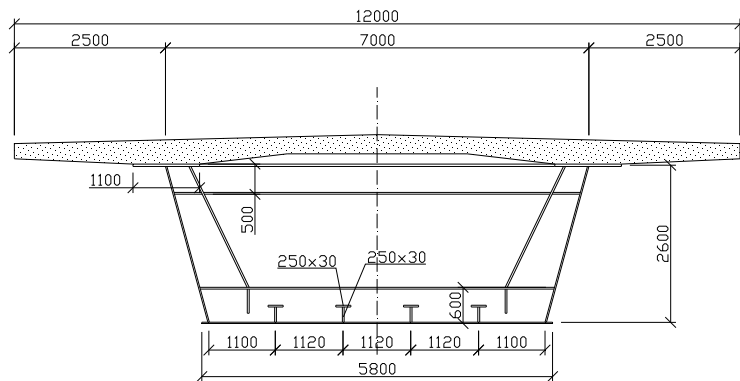


Figura 3. Marco original.

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

- Paso superior mixto de sección cajón. Se ha considerado una de las estructuras incluida en la publicación *Guidance Book Eurocodes 3 and 4. Application to steel-concrete composite road bridges* [1]. Esta estructura, de tablero continuo de 3 vanos de luces 60.00-80.00-60.00 metros, (ver figura 4) está calculada aplicando los parámetros nacionales franceses que reducen la carga uniforme en el carril de lentos por un factor de 0.7 (pasando de 9 a 6.3 kN/m²). En lo relativo a los vehículos pesados, el anejo nacional de Francia reduce el vehículo 1 por un factor de 0.9 (600 kN a 540 kN) y los vehículos 2 y 3 por un factor de 0.8 (400 a 320 kN y 200 a 160 kN). Este ejemplo se ha recalculado aplicando la IAP y la RPX.



	40000	10000	18000	8000	10000	28000	10000	8000	18000	10000	40000
upper flange	35	65	125	70	40	50	40	70	125	65	35
web	18	23	23	23	18	18	18	23	23	23	18
lower flange	20	25	40	30	20	25	20	30	40	25	20

Figura 4. Sección transversal de la estructura mixta considerada

- Flexión transversal de un puente con jabalcones. Se ha considerado el ejemplo del puente de los Santos que se encuentra en la frontera entre las Comunidades Autónomas de Asturias y Galicia sobre la Ría de Eo. Actualmente se está construyendo la ampliación de dicho puente que persigue duplicar su capacidad. El concepto de la ampliación supone ampliar el tablero mediante una losa apoyada sobre jabalcones que transmiten las cargas nuevas a un alma central también de nueva construcción (ver Figura 5). Las calzadas resultantes son de 10.50 metros por lo que, de acuerdo con la IAP, sólo resulta necesario considerar un vehículo pesado por calzada. El modelo del Eurocódigo, sin embargo, permite la aplicación de 3 vehículos pesados en una calzada y esta diferencia

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

incrementa considerablemente el axil en los jабalcones y, *a priori*, parece que podría hacer otro tanto con la flexión local en la losa.

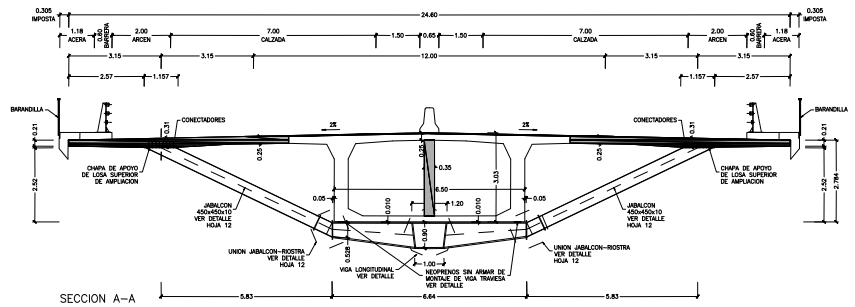


Figura 5 – Sección transversal del Puente de Los Santos ampliado

4. RESULTADOS POR TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

A continuación se resumen los principales resultados obtenidos de los distintos análisis realizados y se avanzan algunas de las conclusiones más relevantes.

4.1 ESTUDIO DE UN PASO SUPERIOR DE HORMIGÓN PRETENSADO

Comparando los resultados obtenidos con las dos series de normativas consideradas se pueden sacar hacer las siguientes observaciones:

- Desde el punto de vista del pretensado, el modelo del Eurocódigo no da lugar a la necesidad de aumentar su cuantía, a pesar de que los esfuerzos de flexión de la combinación frecuente y de ELU son algo mayores para el ancho considerado. En servicio, y, siempre que se considere un ambiente II, se pueden absorber unos esfuerzos mayores para la combinación frecuente permitiendo la fisuración del tablero. Para la combinación cuasipermanente, para la cual las vainas deben estar comprimidas, el modelo del Eurocódigo da lugar a solicitaciones menores debido a que el coeficiente de combinación ψ_{02} de la sobrecarga de tráfico es nulo. En cuanto al ELU, el pretensado suele ir algo holgado, lo cual permite absorber esfuerzos mayores sin reforzar la sección con armadura pasiva
- En cuanto al cortante y la torsión, el modelo del Eurocódigo da lugar a valores algo superiores. En la

España y los Eurocódigos: La necesidad de converger

sección pésima, la torsión se incrementa en un 5%, mientras que el cortante lo hace solamente en un 4%. No se trata, por lo tanto de valores de gran trascendencia.

- En lo relativo a la flexión transversal, se observa que el modelo LM2 del Eurocódigo da lugar a unos esfuerzos de flexión local mayores que el modelo de la IAP. La gran concentración de la sobrecarga LM2 requiere, para un análisis realista, el uso de un modelo tipo placa debido a que la hipótesis de reparto a 45° resulta excesivamente conservadora y daría lugar a la disposición de armadura de cortante en todo el voladizo.

4.2 ESTUDIO DE UN PUENTE DE VIGAS

Del estudio realizado para el puente de vigas, se deduce que el Eurocódigo resulta considerablemente más desfavorable que la normativa española cuando la separación de las vigas es importante (vanos de 15 m). Ello es debido fundamentalmente a la diferencia de modelo en lo relativo al vehículo pesado.

La flexión no resulta tan crítica puesto que, al igual que ocurre con los puentes losa, en ambientes normales, no especialmente agresivos, la sobrecarga no interviene en la combinación cuasipermanente por lo que el problema podría limitarse a una mayor abertura de fisura para la combinación frecuente. En ambientes agresivos sin embargo, habría que recurrir, seguramente, a un mayor número de vigas puesto que los niveles tensionales que se alcanzan en vacío son generalmente muy altos en los diseños habituales. Por otra parte, también se dan problemas en lo referente al cortante cuya solución pasaría o por un ensanchamiento del alma en la zona de apoyos (con la consiguiente complicación en los encofrados y la ferralla) o por un aumento del número de vigas.

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

4.3 ESTUDIO DE MARCOS DE HORMIGÓN ARMADO

A partir del estudio realizado, se puede concluir que no existen diferencias significativas al considerar uno u otro modelo de cargas en lo referente a esfuerzos de flexión. En el dintel se puede obtener un incremento máximo en términos de armadura del 11.6% en el caso de 2.5 m de cobertura de tierras y 7.00 m de luz. En el caso de tener una cobertura de tierras menor, esta diferencia se reduce hasta valores despreciables. Para ilustrar las diferencias obtenidas se incluye la Tabla 1 donde se muestran los momentos y armaduras de flexión obtenidos para el caso de un marco de 12.0 metros de luz, terreno de baja capacidad portante y un espesor de tierras nulo (lo cual tiende a aumentar el efecto de los distintos valores de la sobrecarga).

L=12m Terreno de baja capacidad portante - sin tierra

perfil	IAP/EHE		EC		
	modelo de barras		modelo de barras		
	kNm/m	A _{c,nec} [mm ²]	kNm/m	A _{c,nec} [mm ²]	EC/SC
Centro vano dintel	600.83	1925	605.93	1910	99.22%
empotramiento dintel -hastial	-621.28	1995	-611.18	1950	97.74%
centro de vano hastial	292.11	922	293.92	920	99.78%
empotramiento dintel -losa inferior	-957.99	3128	-949.15	3050	97.51%
empotramiento dintel -losa inferior	-957.99	3160	-949.15	3070	97.15%
centro de vano losa inferior	724.82	2356	713.74	2280	96.77%

Tabla 1. Comparación EC/Normativa Nacional para un marco de 12 m de luz, terreno de baja capacidad portante y sin sobrecarga de tierras

4.4 ESTUDIO DE UN TABLERO MIXTO DE SECCIÓN CAJÓN

Del análisis realizado para el puente mixto, se puede concluir que la normativa española (IAP/RPX) resulta más severa que los Eurocódigos aplicados con los parámetros nacionales franceses en este ejemplo. Las diferencias en cualquier caso no son importantes y no es previsible que los diseños cambien significativamente en el caso de que se decida adoptar los Eurocódigos en sustitución de la normativa nacional.

Especialmente destacable es el hecho de que los Eurocódigos 3 y 4 no exigen limitar las tensiones en servicio a valores significativamente inferiores a la tensión de plastificación (es suficiente con que no se produzca plastificación – ver EN1993 7.3) al contrario de lo que exige la RPX donde dicha tensión debe permanecer por debajo del

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

75% de f_y para la combinación frecuente y por debajo del 90% de f_y para la combinación característica. Este aspecto puede ser importante debido a que puede evitar que el dimensionamiento de la estructura venga condicionado por la acción de las deformaciones impuestas (comportamiento reológico del hormigón, temperatura).

4.5 ESTUDIO DE LA FLEXIÓN TRANSVERSAL EN UN PUENTE CON JABALCONES

En la tabla 2 se muestra la comparación de las reacciones verticales en los Jabalcones debida a la sobrecarga de uso de la IAP y del Eurocódigo. Se observa que incluso teniendo en cuenta la diferencia en la mayoración de las cargas (1.35 del EC frente a 1.50 de la IAP), el Eurocódigo da lugar a un incremento importante de la carga vertical que debe llevarse el jabalcón, particularmente en la zona del borde de la losa donde además pesa el carácter más concentrado de las cargas puntuales (tandems) del Eurocódigo respecto del carro español. Esta diferencia se justifica, sin embargo, fundamentalmente por la consideración en el caso del Eurocódigo de 3 camiones equivalentes a 1200 kN en lugar de un solo camión de 600 kN en el caso de la IAP.

Jabalcón	EC	IAP	EC/IAP (con Mayoración)
	RZ	RZ	
	[kN]	[kN]	
extremo	1187.03	736.052	1.45
intermedio	924.32	653.5	1.27

Tabla 2 – Comparación de reacciones verticales debidas a las sobrecargas de la IAP y del Eurocódigo

El incremento de carga, sin embargo, no se refleja en un aumento significativo de la flexión transversal en el tablero. Como ejemplo se puede ver la diferencia entre los esfuerzos de flexión transversal según IAP (ver figuras 6 y 7) donde el máximo flector negativo (considerando una sección de 1.00 metros de ancho) alcanza 238 kNm mientras que según el Eurocódigo dicho valor máximo es de 201 kNm

España y los Eurocódigos:
La necesidad de converger

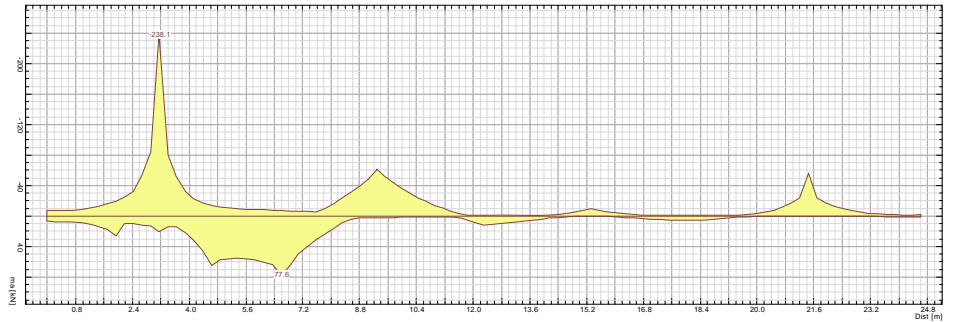


Figura 6 – Momentos transversales según IAP (hipótesis de máximo momento negativo. Ancho de integración: 1.00 m)

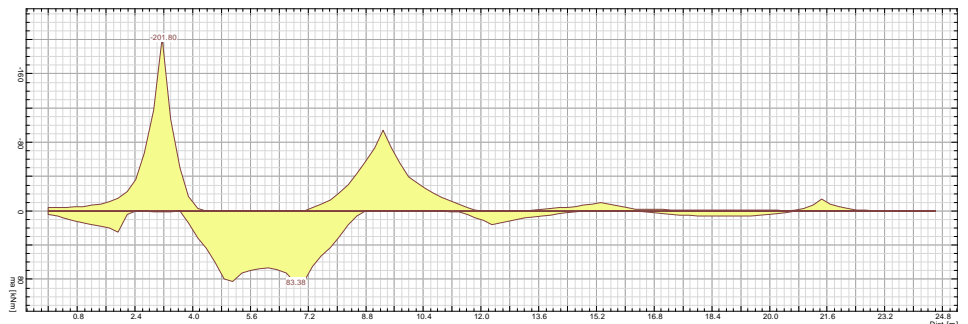


Figura 7 – Momentos transversales según EC (hipótesis de máximo momento negativo. Ancho de integración: 1.00 m)

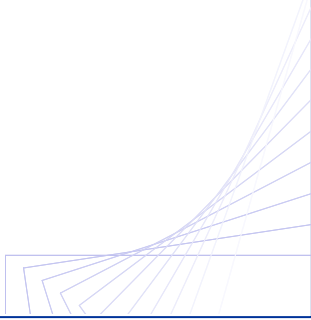
5 CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados cuyo detalle se ha expuesto anteriormente, se pueden sacar las siguientes conclusiones en lo relativo al impacto en el diseño de las estructuras españolas de la adopción de los Eurocódigos como normativa nacional:

En lo referente a puentes losa de anchos moderados:

- La implantación del Eurocódigo no tendría consecuencias en lo referente al diseño del pretensado en el caso de ambientes para los cuales se permita la fisuración. Sin embargo la cuantía de pretensado podría verse incrementada en caso ambientes más agresivos.
- Igualmente el Eurocódigo da lugar a unos esfuerzos de torsión ligeramente superiores a los de la actual normativa IAP. Este aspecto puede ser cuestionable en la medida en que el torsor de la IAP ya resulta de por sí muy difícil de materializar en las pruebas de carga. Este aspecto podría mitigarse mediante la adopción de un parámetro nacional α_{qi} o α_{Qi} inferior a

España y los Eurocódigos: La necesidad de converger



la unidad, aunque no se trata de un incremento importante para el ejemplo analizado.

- En lo referente a la flexión transversal de los voladizos, la aplicación del modelo LM2 debe hacerse mediante un cálculo de placa debido a que un reparto simplificado a 45° da lugar a resultados demasiado pesimistas. En cualquier caso, la zona final del voladizo requerirá armadura de cortante incluso con un cálculo de placa, superándose la resistencia del hormigón en un 50% a pesar de tener en cuenta el efecto RESAL.

En lo referente a puentes de vigas de ancho moderado:

- En el caso de tableros con vigas con separaciones pequeñas, las diferencias entre la aplicación del Eurocódigo o de la IAP son muy escasas. Sin embargo, cuando las vigas están más separadas, la presencia de un segundo carro da lugar a un incremento en los esfuerzos de flexión y de cortante en las vigas intermedias.

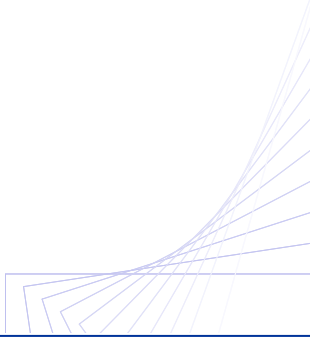
En lo referente a pasos inferiores tipo marco:

- Para este tipo de estructuras se han obtenido resultados similares al dimensionar con las dos normativas consideradas, por lo que no se prevé que el impacto de un cambio de normativa sea significativo.

En lo referente a puentes mixtos de sección cajón:

- Se puede concluir, a partir de los resultados del ejemplo analizado, que no existen diferencias importantes entre el diseño de un puente mixto según Eurocódigos respecto del diseño según la normativa española vigente si se aplican los parámetros nacionales franceses. De hecho las condiciones de servicio (comprobaciones de plastificaciones locales) resultan más condicionantes si se aplica la normativa española (IAP/RPX).

España y los Eurocódigos: La necesidad de converger



En lo referente a la flexión transversal de estructuras de tableros anchos con jabalcones:

- En el caso en que la calzada esté dividida por una barrera rígida, sólo es necesario considerar un vehículo pesado según la IAP. Sin embargo, esta carga concentrada se duplica con el modelo del Eurocódigo y se concentra mucho más al tener 600 kN en un área de $1.20 \times 2.00 \text{ m}^2$. Ello da lugar a un considerable aumento de los esfuerzos en los jabalcones. En lo referente a la flexión transversal, sin embargo, las diferencias son pequeñas y en algunos casos, dependiendo del ancho de reparto utilizado, el Eurocódigo puede ser incluso más favorable que la IAP.

En este trabajo se han analizado, en una serie de casos prácticos, las diferencias existentes entre la aplicación de la normativa española y la normativa europea. Se puede concluir que, en la mayoría de los casos, estas diferencias son pequeñas y que la adopción de los Eurocódigos como normativa nacional no daría lugar a cambios radicales de los diseños actualmente utilizados en España.

6 RECONOCIMIENTOS

Este documento se basa en los trabajos llevados a cabo por los autores en el marco del contrato entre la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento y a UTE formada por Torroja S.A., IDEAM S.A. y FHECOR Ingenieros Consultores correspondiente al Expediente 30.324106-1 1-E TP-003/06 *Desarrollo Normativo en el Campo de Puentes y Estructuras*, cuya directora es Pilar Crespo.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] Raoul, J. Davaline, L. *Guidance Book Eurocodes 3 and 4. Application to steel-concrete composite road bridges*. SETRA. Disponible en Internet.