

Recomendaciones para ampliación de tableros de puentes de fábrica mediante losa volada



Recommendations for widening of masonry bridges through cantilever slabs

Javier Martínez Cañamares

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director Técnico Departamento Obra Civil. Proyecta 79, S.L.

Ganador II Premio Jóvenes Profesionales de la Asociación Técnica de Carreteras

Resumen

Las obras de adaptación de la sección transversal de carreteras existentes a estándares de mayor exigencia por motivos de confort, seguridad y nivel de servicio conllevan unas actuaciones sobre las estructuras de la vía que pueden ser abordadas con diferentes soluciones estructurales, siendo necesario un análisis previo técnico-económico del problema. Además, gran parte de estas actuaciones se realizan en carreteras de montaña sobre puentes de fábrica con un grado de protección histórico-artística importante, lo que nos puede llevar a desechar previamente la posibilidad de demoler y rehacer los puentes afectados por la ampliación, que en algunos casos podría ser favorable desde el punto de vista económico.

El presente artículo aborda uno de los sistemas más competitivos para la ampliación de puentes existentes de fábrica mediante el método de losas autoportantes en voladizo, culminadas con losa de hormigón "in situ" en fase final, permitiendo pasar de los anchos reducidos de algunas estructuras (4-5 m) a secciones mínimas de 7-8 m que permiten el tránsito de vehículos en unas condiciones de seguridad más adecuadas.

Se ha estructurado la exposición mediante un primer bloque que aborda las actuaciones necesarias para la caracterización de la estructura existente sobre la que se sustentará la futura ampliación, una segunda parte que explica la sistemática y parámetros de diseño de la solución, para finalmente, en base a la experiencia de trabajos llevados a cabo así como la implementación de diversos modelos de elementos finitos, obtener una serie de recomendaciones y valores orientativos para facilitar el trabajo de los profesionales que se enfrenten a este tipo de problemática.

PALABRAS CLAVES: ampliación de puentes, caracterización estructuras, losas en voladizo, placas autoportantes, adecuación funcional.

Abstract

The adaptation of the cross-section in existing roads to get more demanding standards for reasons of comfort, safety and service level lead to some actions on structures that can be addressed through different structural solutions, with a previous technical-economic analysis. In addition, many of these actions are performed on mountain roads, over masonry bridges, with an important art-historical protection, which can lead us to discard the possibility of demolish and rebuild the bridges affected by enlargement, that in some cases it might be favorable from an economic point of view.

This article addresses one of the most competitive systems for the widening of existing masonry bridges by the method of self-supporting cantilevered concrete slabs culminated with "in situ" slab in the final stages, allowing moving from narrow widths of some structures (4-5 m) at minimum sections 7-8 m allowing vehicular traffic under conditions of appropriate security.

Exposure is structured by a first block addressing the actions necessary for the characterization of the existing structure, on which will rest the future enlargement, a second part explains the systematic and the parameters of design of the solution, to finally, based on work done, and the implementation of various finite element models, obtain a series of tips and guide values to facilitate the work of professionals who face this kind of problem.

KEY WORDS: bridges expansion, structural characterization, cantilevered slabs, self-resistant precast, functional adequacy.

1. Planteamiento general del problema

Dentro de las diferentes actuaciones de rehabilitación, ampliación y mejora de la red de carreteras, nos encontramos con una problemática habitual referente a la ampliación de tableros en puentes y obras de paso, al tener que adaptar la sección de la calzada a los requisitos funcionales de la vía en su estado final, condicionado por las necesidades de seguridad, capacidad, comodidad e integración.

El presente artículo trata de reflejar el proceso de diseño y ejecución de los diferentes casos con los que nos podemos encontrar, basándose en experiencias reales abordadas con éxito, así como un resumen y estandarización de los parámetros y resultados que sirvieron de base para la determinación de las principales características de diseño y evaluación estructural, de tal forma que pueda ser el germen para, en un futuro, y con la formación de un grupo de trabajo experto en la materia con el que se pueda poner en común el mayor número de experiencias posibles, redactar un documento de referencia para las recomendaciones en ampliaciones de tableros de puentes de fábrica mediante losa volada.

2. Caracterización previa

Es importante señalar que el estudio se centra en la ampliación de tableros de puentes bóveda semicirculares (de medio punto y rebajados), de piedra, sillería u hormigón con diferentes rellenos entre tímpanos, partiendo de la hipótesis de que tenemos garantizadas las condiciones de estabilidad y resistencia de la cimentación y la subestructura. Para ello, antes de acometer el diseño de la ampliación de la superestructura (tablero y elementos auxiliares asociados) se estima preceptiva una inspección de las que la "Guía para la realización de inspecciones principales de

obras de paso en la Red General del Estado" [5] considera como especiales, abarcando la zona de cimentación, incluyendo características del terreno, la bóveda y sus principales aspectos geométricos y resistentes, relleno del extradós, así como todo lo referente a los tímpanos, parapetos y superficie de calzada. En esta fase, como suele ser habitual, al no existir generalmente documentación gráfica de la geometría y materiales, se debe realizar una minuciosa campaña de campo para la caracterización de todos los parámetros necesarios para analizar la seguridad de la estructura frente a las nuevas cargas de diseño, según el modelo de cálculo adoptado. De todo ello, se obtendrá un informe de caracterización con las recomendaciones necesarias en cuanto a la viabilidad de la utilización de la estructura, los parámetros de terreno y relleno, así como la geometría existente y las propiedades de resistencia y durabilidad de la bóveda y cimentación. Se trata del punto de partida para el posterior análisis

de la ampliación de la superficie de calzada mediante losas voladas.

Todo el proceso y la sistemática a llevar a cabo para la obtención del informe de caracterización, abordado en diversas publicaciones y estudios realizados, no forma parte del objeto del presente artículo, suponiendo, por tanto, que se parte del cumplimiento integral de las comprobaciones estructurales necesarias de la bóveda, estribos y cimentación, o que, en caso contrario, se plantean las acciones necesarias de refuerzo a llevar a cabo para la adaptación de la estructura frente a las nuevas solicitaciones, fruto de la ampliación y de la evolución de las exigencias normativas.

Por tanto, en primera instancia, centrado el problema en analizar exclusivamente la ampliación de la losa para ajustar la plataforma a las nuevas necesidades de la sección del vial, debemos comenzar por estudiar los parámetros específicos para el posterior diseño; en concreto los indicados en la Figura 1 y en la Tabla 1.

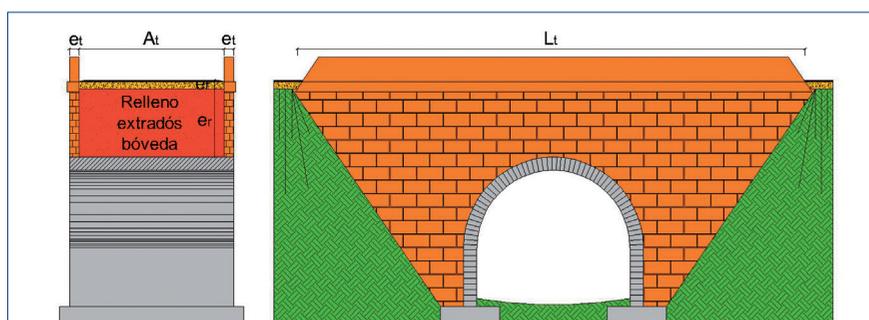


Figura 1. Esquema de parámetros de partida necesarios para el diseño de la ampliación.

Tabla 1. Resumen datos de partida a obtener en la campaña de campo.

Datos geométricos	
L_t :	longitud de puente entre terraplenes de acceso
A_t :	ancho de tablero en la zona de rodadura previa a la ampliación
e_t :	espesor de los pretilos existentes
e_f :	espesor del paquete de firme
e_b :	espesor relleno extradós bóveda
Parámetros geotécnicos relleno extradós bóveda	
r :	peso específico material relleno
ϕ_r :	ángulo rozamiento interno
c_r :	cohesión
ζ_{adm} :	tensión admisible
Existencia y funcionamiento del drenaje del relleno	



Figura 2. Realización de catas para la determinación de espesores de firme y relleno.

La recopilación de estos datos de partida se torna totalmente imprescindible para la realización de un adecuado diseño de la ampliación del tablero, por lo que cuanto más minuciosa e intensa sea la campaña realizada mayor aproximación a la solución óptima se podrá alcanzar. Sin embargo, en la mayoría de los casos abordados las dotaciones económicas establecidas para estos trabajos de caracterización son insuficientes, y en algunos casos inexistentes, por lo que se debe actuar comenzando por optimizar los escasos recursos disponibles, no renunciando a obtener valores de referencia, planeando previamente qué trabajos realizar y cuáles no, mediante el objetivo de obtener la máxima información al menor coste posible, realizando las hipótesis y comprobaciones necesarias.

Los datos geométricos L_r , A_t y e_t suelen extraerse de manera sencilla y directa con la toma de datos mediante equipos topográficos (GPS, estación total, niveles), e incluso, dependiendo

del nivel de precisión necesaria, con elementos menos sofisticados como equipos láser de lectura directa y cintas métricas.

Para la determinación de los parámetros referentes al espesor de las capas de firme y relleno, e_f y e_r , es necesaria la realización de trabajos de muestreo mediante catas que permitan descubrir la profundidad y diferenciación de cada una de ellas.

Por su parte, la determinación de las características del material de relleno, necesarias para el posterior diseño de los elementos de transmisión de cargas a la bóveda de la ampliación de la losa, se obtendrán mediante trabajos específicos de reconocimiento geotécnico, en base a ensayos de caracterización y toma de muestras.

Es importante destacar que al tratarse, normalmente, de espesores de material de relleno en el extradós de la bóveda relativamente poco profundos, y además, generalmente formado por material granular, no se plantea eficaz, desde aspectos técnico-eco-

nómicos, la realización de sondeos a rotación.

Por ello, en diversas campañas llevadas a cabo para este tipo de ampliaciones, se ha optimizado la manera de actuar para la obtención de los parámetros necesarios para el diseño, de una manera sencilla, con gran rendimiento y con la obtención de valores representativos del material de relleno.

En este sentido, partiendo de las catas realizadas, ineludibles para determinar los espesores anteriormente mencionados, se debe plantear la toma de muestras, en este caso alteradas, para el posterior análisis en laboratorio.

Para cada una de las muestras se estima necesaria la realización de los ensayos indicados en la Tabla 2.

Adicionalmente, para la determinación de la tensión admisible del relleno se recomienda acompañar la campaña de catas con "ensayos de penetración dinámica (UNE 103 801-94)" utilizando penetrómetro tipo D.P.S.H., equipado con una puntaza perdida

Tabla 2. Obtención de parámetros del relleno a partir de ensayos sobre muestras.

Tipo de ensayo	Parámetros obtenidos
Humedad natural UNE 103300	γ_r : peso específico material
Análisis granulométrico por tamizado UNE 103101	ϕ_r : ángulo de rozamiento interno
Límites de Atterberg UNE 103103 y UNE 103104	c_r : cohesión
Densidad aparente UNE 103301	Drenaje del relleno
Densidad relativa de partículas UNE 103302	
Ensayo de corte directo UNE 103401	
Contenido de sulfatos UNE 103201	

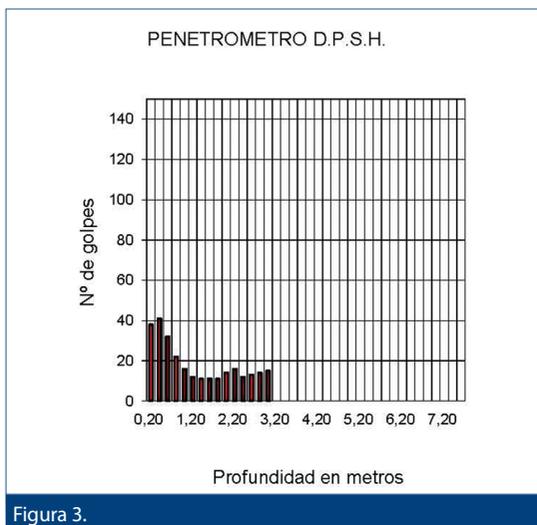


Figura 3.

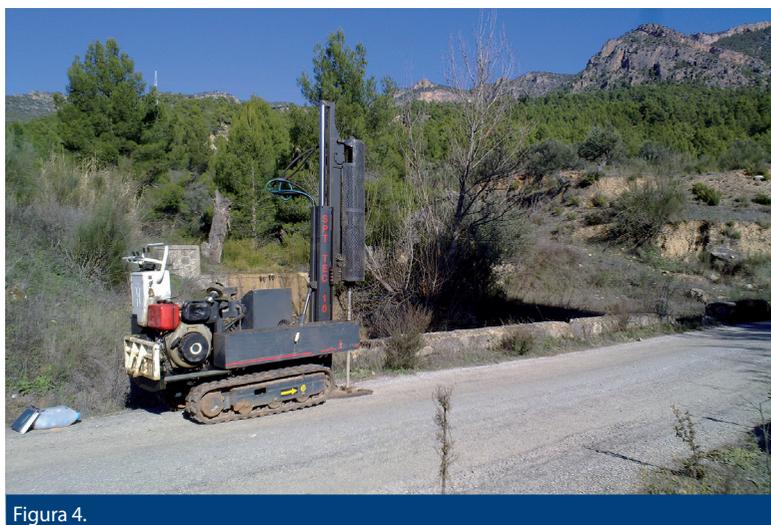


Figura 4.

de sección cónica con un diámetro de 50,5 mm y área nominal de la sección de 20 cm² y un varillaje macizo de 33 mm de diámetro, ejecutándose la hincada de la puntaza por caída libre de una maza de 63,5 kg desde una altura de 76 cm.

La representación de resultados del ensayo muestra una gráfica enfrentando la profundidad alcanzada en referencia al número de golpes, proporcionando los diagramas profundidad – N20 (Figura 3). Estos diagramas determinan la existencia de los distintos estratos atravesados, siendo verdaderas radiografías resistentes del suelo en el punto investigado. Aplicando a cada estrato homogéneo la comprobación de la

consistencia de los resultados obtenidos por el penetrómetro dinámico, utilizando la “fórmula de los holandeses”, que relaciona los parámetros del ensayo con la tensión admisible del terreno, podemos tener, de manera fiable, un valor adecuado para el posterior estudio estructural de la ampliación de la losa del puente.

Con todos estos datos, para un caso general de ampliación de tablero podremos tener una base adecuada para el posterior diseño de la actuación. Esta fase inicial de toma de datos se debe desarrollar bajo los máximos niveles de rigurosidad y veracidad, ya que son la base de los posteriores cálculos y dimensionamientos. Por ello, se recomienda que

la campaña esté dirigida por un técnico especialista en estructuras, con conocimientos geotécnicos y de los métodos de ensayo utilizados para la determinación de las características de los materiales (Tabla 3).

De la misma manera, en base a diferentes experiencias, se expone a continuación un cuadro resumen de las recomendaciones planteadas en referencia a la elección y cuantificación de los trabajos a realizar para la determinación adecuada de los parámetros geométricos y geotécnicos dentro de una campaña de ampliación de estructuras enmarcada en un proyecto global de ensanche y mejora de la vía objeto de la actuación principal (Tabla 4).

Tabla 3. Obtención de parámetros del relleno a partir de ensayos sobre muestras.

Tipo de ensayo	Parámetros obtenidos
Ensayo de penetración dinámica UNE 103 801-94	$\zeta_{adm,r}$: tensión admisible Distribución de estratos

Tabla 4. Resumen de recomendaciones para una campaña de caracterización de una estructura existente.

Tipo de trabajo	Datos reportados	Alcance
Toma de datos geométricos mediante topografía y elementos de medición básica	L_r : longitud puente A_r : ancho tablero existente e_r : espesor pretilas	100 % puentes de la vía objeto de ampliación
Catas de inspección sobre el material de relleno del extradós de la bóveda	γ_r : peso específico material ϕ_r : ángulo rozamiento interno c_r : cohesión drenaje del relleno	1/500 m ³ material relleno (mínimo 1 por puente)
Ensayos de penetración dinámica (D.P.S.H.)	$\zeta_{adm,r}$: tensión admisible Distribución de estratos	1/500 m ³ material de relleno (si las catas van mostrando material similar, bajo aceptación de la dirección, se puede subir el lote a 1/1.000 m ³ , mínimo 1 por puente)

3. Comprobaciones básicas

Comenzaremos por exponer la idea general de la solución habitualmente utilizada en los casos de ampliaciones de losas de tablero sobre puentes bóveda existentes, para poder justificar posteriormente las comprobaciones básicas de diseño que será necesario realizar.

Pues bien, la solución de losas voladas se define mediante el esquema constructivo recogido en la Figura 5.

Se plantea un modelo de vigas corridas de apoyo para la ampliación de la losa, mediante hormigón armado "in situ", dispuestas sobre el material de relleno del extradós de la bóveda. Previamente, y en función del estudio del incremento de tensiones transmitidas a los muros de mampostería laterales por las nuevas solicitaciones, podría ser necesaria la realización de barras transversales de atado de muros, para evitar su deformación lateral y desplome. Disponiendo las vigas comentadas de los correspondientes conectores, que garantizarán el correcto funcionamiento del modelo de cálculo, se procede a montar las prelosas colaborantes prefabricadas, de hormigón armado. En función del peralte necesario y de las condiciones geométricas de la vía que discurre sobre el puente, se nivela cuidadosamente el contacto entre las vigas de apoyo y las prelosas mediante mortero de alta resistencia y baja retracción. Las prelosas realizarán la doble función, primero autoportante, bajo las cargas de hormigonado y, a su vez, de encofrado perdido, permitiendo gran versatilidad y rendimiento en la ejecución, siendo una solución comparativamente rentable frente a aquellas que exigen cimbras y encofrados intermedios, en muchos casos, tremendamente costosos y no viables en aquellos casos en los que la altura del puente sea significativa. Se completa el esquema constructivo con la disposición de la armadura necesaria para la losa de hormigón "in situ" y su posterior hormigonado. Finalmente, se realizan las actuaciones correspondientes a los elementos de acabado, como son la disposición de pretilas y la ejecución de la terminación del pavimento.

Todo el proceso, nos lleva a tener en cuenta las siguientes comprobaciones básicas en la fase de diseño:

Diseño del voladizo de la losa

Atendiendo a la vigente Instrucción de Acciones sobre Puentes (IAP-11), y en lo que se refiere al diseño del vuelo de la losa de ampliación, se deberá tener en cuenta en el modelo de cálculo a implementar en el diseño la situación de solicitaciones que se indica en la Figura 6.

Distinguiremos dos fases de funcionamiento, la de montaje y la de servicio.

En la primera de ellas, se tendrán en cuenta los esfuerzos obtenidos por el peso propio de las prelosas y el hormigón fresco, aplicando, adicionalmente, una sobrecarga repartida variable de 1 kN/m² para tener en cuenta las acciones produ-

cidas durante el tránsito de los operarios para la colocación, vibrado y puesta en obra del hormigón. En esta fase, como elemento resistente fundamental tendremos que considerar la aportación de la resistencia de las prelosas armadas como elemento autoportante.

En servicio entran en consideración todas las acciones referentes al peso propio de la losa de sección compuesta, la carga muerta introducida por el pavimento (y su posible recrecido hasta el 50 % de espesor), así como los elementos de acceso y contención (aceras, pretilas y barreras).

Adicionalmente, en esta fase de utilización se tienen en cuenta las sobrecargas establecidas en la normativa de referencia, en el caso del territorio español, la IAP-11. En trabajos de ampliación normalmente se pasa de an-

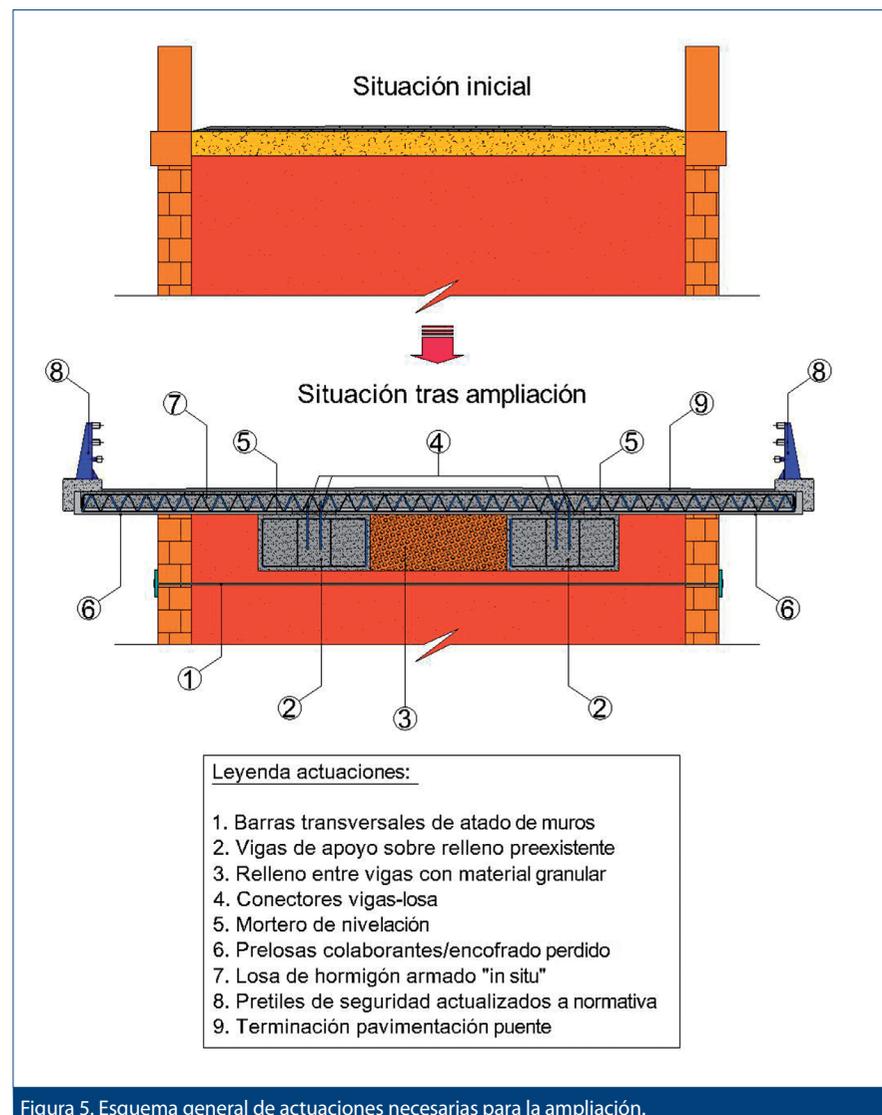


Figura 5. Esquema general de actuaciones necesarias para la ampliación.

chos de calzada de 4,00-5,00 m a anchos mínimos de 6,50-7,00 m por lo que nos encontraremos en el caso $w > 6,00$ m de la IAP-11, en cuanto al establecimiento de sobrecargas mediante los carriles virtuales propuestos. Por su parte, la carga repartida y la disposición o no de carros de carga viene determinada por el efecto favorable o desfavorable que produzcan. Por ello, según el esquema anterior, se plantea una sobrecarga de 9 kN/m^2 extendida en la zona de calzada del voladizo, y el correspondiente carro de carga (de 300 kN por eje, con separación longitudinal entre ejes de $1,20 \text{ m}$ y transversal entre ruedas de cada eje de $2,00 \text{ m}$) separado $0,50 \text{ m}$ del borde de la acera o elemento prefabricado del pretil.

Será objeto de comprobación la sección crítica correspondiente al apoyo, dimensionando, a partir del canto establecido, las necesidades de cuantías de acero para el cumplimiento de las verificaciones a esfuerzos momento negativo, cortante y rasante viga-losa, todo ello diferenciando las fases de carga enunciadas anteriormente.

Diseño de zona de losa entre vigas de apoyo

En este caso, tratamos de buscar las acciones que nos produzcan los mayores esfuerzos en la zona central, entre las vigas de apoyo de la ampliación de losa, por lo que en el modelo de cálculo a implementar en el diseño se deberá tener en cuenta la situación de solicitaciones indicada en la Figura 7.

La carga correspondiente al carril virtual 1, de 9 kN/m^2 , estará aplicada centrada entre las vigas de apoyo, de la misma manera que el carro de 600 kN .

De forma similar que en el caso de diseño del voladizo, tendremos en cuenta las fases de montaje y utilización.

Bajo esta hipótesis, será objeto de comprobación la sección crítica correspondiente a la zona central entre vigas, dimensionando, a partir del canto establecido, las necesidades de cuantías de acero para el cumplimiento de las verificaciones a esfuerzos momento positivo, cortante y rasante viga-losa, todo ello

diferenciando las fases de carga enunciadas anteriormente.

Diseño de las vigas de apoyo sobre relleno

Tomaremos para el diseño de las vigas de apoyo, como hipótesis más desfavorable, el caso de uno de los ejes del tren de cargas (300 kN) centrado sobre la viga de apoyo, al igual que la sobrecarga repartida (9 kN/m^2) (Figura 8).

Las vigas se sustentan en el relleno del extradós de las bóvedas, por lo que, para nuestro modelo de cálculo, tendremos que partir de los datos que la campaña previa de caracterización de materiales nos haya determinado, tanto en referencia a la tensión admisible de dicho relleno, como a su coeficiente de balasto, para simular un modelo de viga sobre apoyos elásticos (viga Winkler). De

esta manera podemos determinar tanto el ancho necesario de las mismas, como el canto y cuantías de acero necesarias, bajo las comprobaciones de comparación entre tensión transmitida en servicio y las verificaciones a flexión de las vigas apoyadas sobre el sistema discreto de muelles.

Precauciones de montaje y diseño de prelosas colaborantes

Las prelosas colaborantes, funcionando como sección simple en la hipótesis de montaje, deben garantizar las condiciones resistentes ya mencionadas bajo la carga del hormigón fresco que no constituye la sección compuesta hasta el fraguado. Además, se debe contemplar en esta fase una carga adicional correspondiente al desplazamiento de operarios y materiales sobre las prelosas.

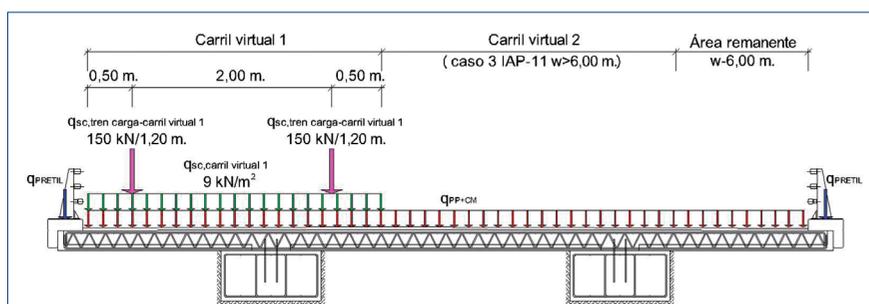


Figura 6. Acciones para el diseño del voladizo de la ampliación de losa.

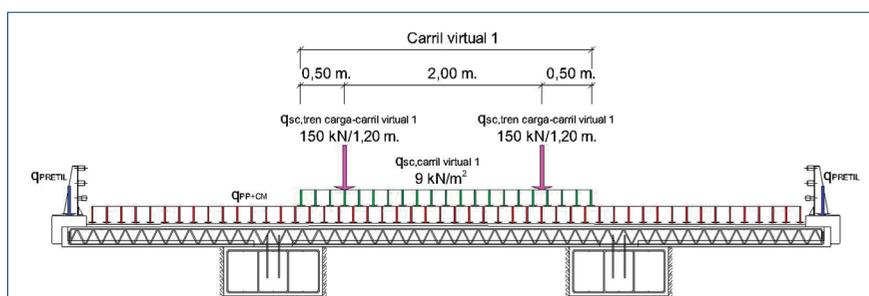


Figura 7. Acciones para el diseño del voladizo de la ampliación de losa.

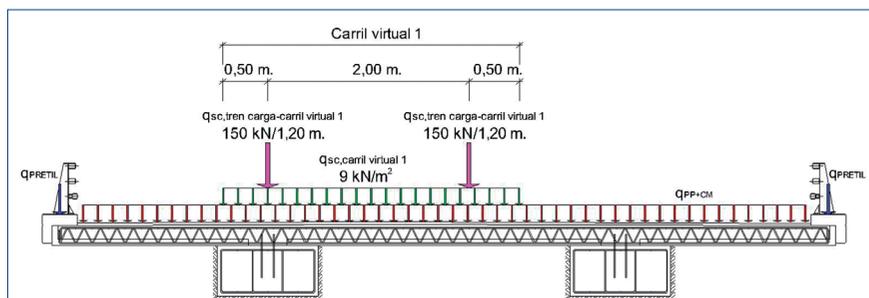


Figura 8. Acciones para el diseño del voladizo de la ampliación de losa.

Por otra parte, es habitual que estas prelosas dispongan de una celosía de armado que forma la conexión entre las placas exteriores de los vuelos y la placa central entre vigas de apoyo, para su funcionamiento autoportante. Pues bien, en el izado y en la hipótesis de servicio es imprescindible chequear el pandeo de las ramas superior e inferior de dicha celosía, para evitar problemas por deformaciones previas excesivas entre las placas exteriores e interior.

Diseño de las barras transversales de atado de muros

En función de la relación entre el ancho inicial y el ancho final, la ampliación del tablero del puente produce un incremento considerable de las cargas transmitidas al relleno del extradós de las bóvedas. De la misma manera, se producirá un empuje adicional sobre los muros verticales que, en muchos casos, puede traducirse en deformaciones de cierta magnitud, poniendo en peligro la estabilidad de los mismos.

Por ello, generalmente se disponen barras transversales con anclajes en los extremos en la coronación de dichos muros, para coaccionar su desplazamiento, produciendo un efecto de atado o arriostamiento.

El concepto que debemos tener en cuenta para su diseño se muestra en la Figura 9.

Estudio de las deformaciones longitudinales

Se podría afirmar que, de manera prácticamente generalizada, este tipo de estructuras carece de juntas transversales de dilatación, tanto en extremos como en puntos intermedios. No obstante, al introducir la nueva losa de hormigón, se deben tener en cuenta los efectos producidos por las deformaciones longitudinales, para determinar la necesidad de introducir juntas.

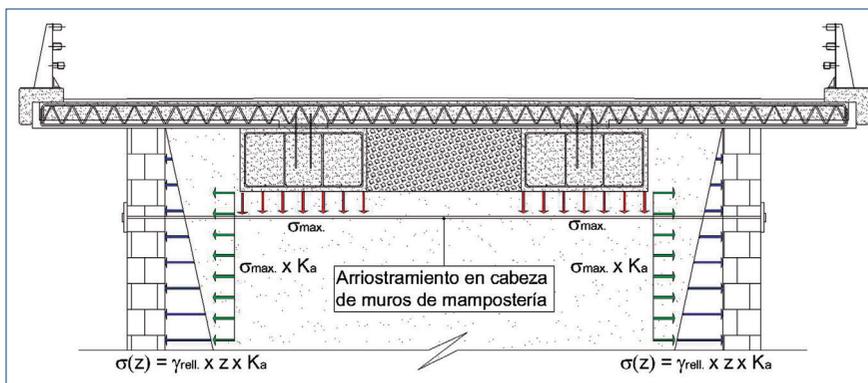


Figura 9. Acciones para el diseño del voladizo de la ampliación de losa.

4. Desarrollo de la ejecución

Para mejorar el entendimiento de la solución técnica que aborda el presente artículo, se muestra a continuación, una exposición gráfica, acompañada de ilustraciones fotográficas, de casos reales llevados a cabo en recientes actuaciones de ensanches de estructuras de carreteras de montaña, en las que se ha participado como asistencia técnica y control de calidad.

El desarrollo de la ejecución, partiendo de la situación inicial lleva asociadas las siguientes fases:

Fase 1

Partiendo de la situación inicial de la estructura se comenzará por eliminar los pretilos o barreras de protección existentes. Posteriormente, será necesario demoler, cargar, transportar y gestionar el material correspondiente al paquete de firme más la capa granular hasta enrasar con la cota de relleno definida en los trabajos de diseño de la ampliación.

Fase 2

En función de las necesidades de arriostar los muros laterales de mampostería, determinadas en el cálculo de empuje producidos por la sobrecarga adicional introducida por la ampliación del tablero, se realizará la excavación necesaria para introducir las barras transversales de atado de muros, anclando en los extremos mediante placas con soldadura o sistemas de pernos roscados. Las barras de acero normalmente utilizadas son simples

corrugados B400S/B500S, aunque en casos especiales puede plantearse la necesidad de acudir a tendones más específicos. Tras la ejecución de estos trabajos, será necesario realizar la excavación para las vigas de apoyo, así como la zona intermedia de futuro material granular (según las especificaciones de diseño, ya que en algunos casos el propio material de relleno existente aporta las características necesarias, y no es necesaria su sustitución).

Fase 3

Preparada la excavación, se dispondrá la armadura prevista en el diseño y se procederá al hormigonado de las vigas de apoyo, dejando los conectores necesarios para la conexión con la losa, que formará la ampliación de tablero, propiamente dicha. A continuación, se dispondrá el mortero de nivelación en la superficie de contacto entre las prelosas y las vigas de apoyo. Por último, se montarán en esta fase las prelosas colaborantes/enconfrado perdido, se dispondrá del armado establecido para la losa, y se hormigonará según el espesor y geometría predefinida.

Fase 4

Finalmente, restarán las actividades correspondientes a la terminación del pavimento, normalmente con capa de mezcla asfáltica. De la misma manera, se dispondrán las aceras y nuevos pretilos ajustados a normativa, obteniendo de esta manera la nueva sección del puente ampliada y actualizada a las necesidades del ensanche de la carretera.



Figura 10. Actuación en Fase 1 de demolición de pretilas y paquete de firme.



Figura 11. Actuación en Fase 2 de barras transversales de atado y excavación para vigas de apoyo.



Figura 12. Actuación en Fase 3, hormigonado de vigas de apoyo, disposición de prelasas y acabado de la losa.



Figura 13. Actuación en Fase 4, pavimentación y acabados.



5. Parámetros de diseño. Recomendaciones

En el primer apartado del presente artículo, se establecían una serie de trabajos de caracterización para determinar los parámetros básicos de la estructura existente objeto de ampliación (longitud del puente, anchura, características del relleno, etc.). Analizado el alcance de las acciones a realizar y las recomendacio-

nes de los parámetros a obtener del puente en su estado inicial, nos pondremos a continuación a valorar aquellos parámetros propios de la ampliación del tablero, mediante la ya expuesta sistemática de losas voladas prefabricadas.

De manera simplificada, nos restará el estudio y dimensionamiento de las variables del sistema estructural aplicado para la ampliación (Figura 14).

Para ello, se ha recabado la información de diversas actuaciones reales diseñadas y revisadas, que se introdujeron en diversas herramientas informáticas de cálculo mediante un modelo de elementos finitos, reproduciendo el comportamiento de la losa según elementos tipo "shell" o placa a flexión, conectados mediante barras verticales tipo "viga" de rigidez infinita, para simular la conexión entre la losa y las vigas de apoyo, simulando estas últimas mediante barras horizontales también tipo "viga" con rigidez asociada correspondiente a la sección de hormigón. Por último, el apoyo entre las vigas corridas y el material de relleno granular se simuló mediante "muelles elásticos", con la rigidez correspondiente al coeficiente de balasto extraído de la campaña previa de caracterización del relleno.

Para obtener los parámetros de referencia, que se exponen a continuación, se han analizado más de 30 modelos, jugando con las principales variables (terreno y geometría de la ampliación).

De dicho estudio, fijando algunas variables a los casos más comunes, podemos plantear las siguientes recomendaciones:

Canto losa de ampliación sección compuesta (prelosa+losa in situ)

Este parámetro suele estar bastante estandarizado, fijando inicialmente en el modelo un canto ajustado al cumplimiento bajo esfuerzos cortantes sin necesidad de introducir a la sección de comprobación ramas transversales de cortante. En casos habituales se suele fijar un canto mínimo de 20 cm en el extremo, variable en función de la pendiente transversal de la vía, que se traduce en la propia losa. En función de las dimensiones del vuelo y la parte central se recomienda ajustar el canto hasta un máximo de 30 cm para los casos con los voladizos por encima

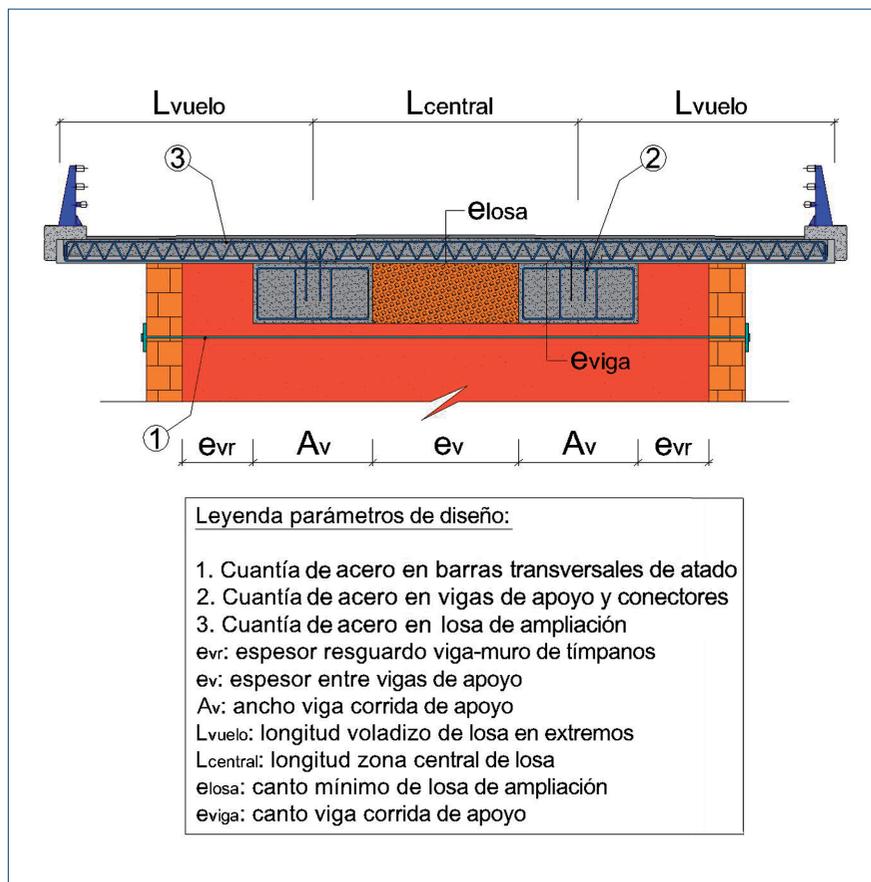


Figura 14. Esquema de parámetros de diseño de la ampliación del tablero.

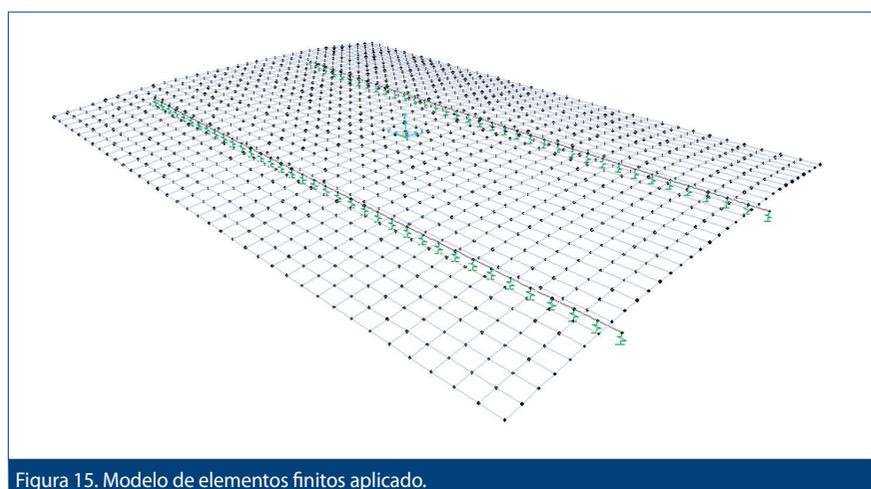


Figura 15. Modelo de elementos finitos aplicado.

de los 2 m de longitud hasta los 3 m, límite en el que este sistema puede dejar de ser competitivo frente a otras soluciones. Todo ello, incluyendo en estos espesores el espesor habitual de las prelasas colaborantes, que suele ser de 5-6 cm.

Espesor resguardo viga-muro de tímpanos

Habitualmente, en el diseño de este tipo de actuación se persigue minimizar la longitud de vuelo a disponer, de manera coherente a las necesidades de ampliación de la sección. Sin embargo, es necesario tener cierta capacidad de reparto de la carga transmitida mediante las vigas al relleno granular de la estructura, por lo que será necesario garantizar una separación mínima respecto a los muros de tímpano que, como regla general, se encuentran comprendidas entre 50-75 cm.

Dimensiones de vigas de apoyo

Vendrán condicionadas por las características del material de relleno, principalmente por su tensión admisible y por el coeficiente de balasto. En la Tabla 5 se recogen tres grupos diferentes en función de los tipos de relleno generalmente utilizados en el extradós de las bóvedas, para lo que se indican las dimensiones de ancho y canto de viga compatibles con las características portantes del material.

Estos valores han sido extraídos fijando las variables de longitud de vuelo y central para el caso más común de ampliación de una sección de ancho 5,50-6,00 m inicial a 8,00 m final, con voladizos de 2,00 m y 4,00 m en zona central, medido entre ejes de vigas, variando las condiciones de contorno del relleno para la obtención de los valores de las dimensiones de referencia para dichos elementos.

Tabla 5.

Tipo material relleno	Ancho de viga (m)	Canto de viga (m)
Material arcilloso Tensión admisible 1,5-2,0 kg/cm ² Coeficiente balasto ≈ 5 kp/cm ³	1,50-1,20	0,80-0,60
Material arena media Tensión admisible 2,0-3,0 kg/cm ² Coeficiente balasto ≈ 10 kp/cm ³	1,20-1,00	0,60-0,40
Material grava compacta Tensión admisible >3,0 kg/cm ² Coeficiente balasto ≈ 20 kp/cm ³	1,00-0,80	0,40-0,30 ó mínimo para anclaje barras de conexión

Tabla 6.

Tipo material relleno	Cuantía necesaria acero B500S (cm ² /m)
Material arcilloso Tensión admisible 1,5-2,0 kg/cm ² γr: peso específico 1,80-2,00 tn/m ³ φr: ángulo rozamiento interno 18°-20° cr: cohesión 0,50-1,00 tn/m ²	3,00-3,50
Material arena media Tensión admisible 2,0-3,0 kg/cm ² γr: peso específico 1,80-2,00 tn/m ³ φr: ángulo rozamiento interno 30°-33° cr: cohesión 0,00 tn/m ²	2,50-3,00
Material grava compacta Tensión admisible 2,5-3,0 kg/cm ² γr: peso específico 2,00-2,20 tn/m ³ φr: ángulo rozamiento interno 35°-38° cr: cohesión 0,00 tn/m ²	2,00-2,50

Cuantías de acero en vigas de apoyo

El caso establecido, plantea una viga apoyada sobre resortes elásticos que simulan de manera discreta el contacto entre la viga y el terreno.

En términos generales, y salvo valores del material de relleno fuera de lo común (muy flexibles, con coeficientes de balasto por debajo de lo presumible para un material granular) las cuantías de acero en vigas de apoyo suelen venir condicionadas por las cantidades de acero mínimas establecidas en la EHE-08 según las características geométricas de la sección, y que oscila entre el 2,8 y el 3,3 por mil respecto a la sección total del hormigón.

Cuantías de acero en barras transversales de atado

Según se reflejó dentro de las comprobaciones básicas de diseño, es importante contemplar el empuje horizontal producido por el incremento de carga introducido por la ampliación de la sección del puente mediante una presión adicional sobre el trasdós de los muros. En función de la altura de relleno, sus características geotécnicas (peso específico, cohesión y ángulo de rozamiento) y las condiciones de drenaje del relleno, obtendremos la cuantía de acero necesaria para las barras transversales de atado de los muros. Para cada caso específico, se deberá

analizar según el esquema de cálculo establecido en el apartado de comprobaciones básicas.

No obstante, en la Tabla 6 se indican algunos baremos de estas cuantías.

De la misma manera que en el anterior apartado, se han fijado con el mismo criterio los parámetros de longitudes de vuelos y zona central, dejando variar el tipo de material del extradós de la bóveda. La altura de relleno máxima contemplada es de 2 m,

valor normalmente mayor al espesor usual registrado en este tipo de estructuras. En el dimensionamiento se debe limitar la tensión a la que sometemos a las barras, ya que se trata de limitar los desplazamientos, por lo que se recomienda fijar una tensión máxima reducida de las barras del orden del 50 % de la resistencia del límite elástico. Por otra parte, es habitual repartir la cuantía con separaciones entre barras del orden de 2 m, tomando barras de acero de mayor sección para dañar lo menos posible a la estructura existente.

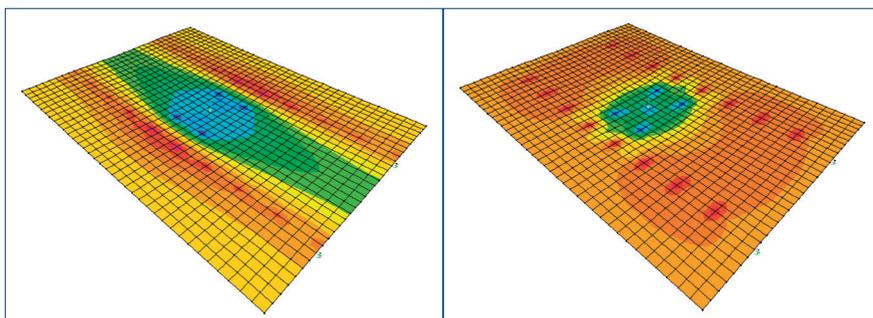


Figura 16. Esfuerzos M11 y M22 bajo hipótesis de sobrecarga repartida y carro de carga centrados.

Tabla 7. Cuantías de armado para zona de losa central entre vigas de apoyo.

Tipo material relleno	Cuantía longitudinal inferior (cm ² /m)	Cuantía transversal inferior (cm ² /m)
<u>Grupo I</u> Material arcilloso Coeficiente balasto ≈ 5 kp/cm ³	12,00-14,00	14,00-16,00
<u>Grupo II</u> Material arena media Coeficiente balasto ≈ 10 kp/cm ³	11,00-13,00	13,00-15,00
<u>Grupo III</u> Material grava compacta Coeficiente balasto ≈ 20 kp/cm ³	10,00-12,00	12,00-14,00

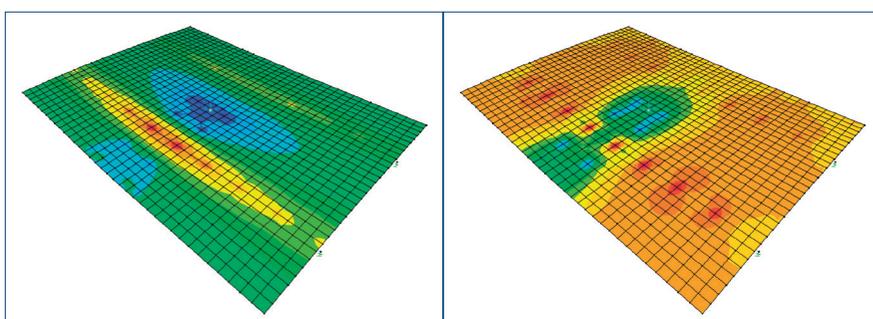


Figura 17. Esfuerzos M11 y M22 bajo hipótesis de sobrecarga repartida y carro de carga en extremo de voladizo.

Tabla 8. Cuantías de armado para zona de voladizos extremos de losa de ampliación.

Tipo material relleno	Cuantía longitudinal superior (cm ² /m)	Cuantía transversal superior (cm ² /m)
<u>Grupo I</u> Material arcilloso Coeficiente balasto ≈ 5 kp/cm ³	6,00-8,00	24,50-26,50
<u>Grupo II</u> Material arena media Coeficiente balasto ≈ 10 kp/cm ³	5,00-7,00	24,00-26,00
<u>Grupo III</u> Material grava compacta Coeficiente balasto ≈ 20 kp/cm ³	7,00-8,00	24,00-26,00

Cuantías de acero en losa de hormigón armado

De las diferentes hipótesis de combinación de acciones con las posiciones más desfavorables de las sobrecargas y el carro, según los criterios establecidos en la IAP-11, podemos resumir, para el caso de un espesor medio de losa de 25 cm de hormigón HA-25, con la distribución de voladizos y zona central comentados (caso más común de ampliaciones), podemos resumir las siguientes recomendaciones, aunque es conveniente señalar que, en todo momento, estamos facilitando un orden de magnitud para valoraciones previas, siendo conveniente y preceptivo ajustar el modelo de cálculo a las condiciones específicas de cada caso.

- Zona de losa central entre vigas de apoyo.
(Figura 16) (Tabla 7).
- Zona de voladizos extremos de losa de ampliación.
(Figura 17) (Tabla 8).

Disposición de juntas de dilatación

Estudiadas las deformaciones máximas que se pueden producir por la retracción, fluencia (suele desprejarse al no haber estados de tensiones normales) y variación térmica, se estiman valores globales en el entorno del 6-7 por mil de la longitud del puente, por lo que para los

casos habituales de una bóveda con longitudes inferiores a 30 m, se obtendrían deformaciones alrededor de 10 mm, que no exigirían la introducción de juntas de dilatación. Por encima de estas longitudes podría ser necesario introducir juntas extremas y, en algún caso, intermedias, si la longitud sobrepasa los 100 m. Por razones de facilidad en la ejecución y conservación es recomendable realizar juntas elásticas tipo "chicle" a partir de mezcla en caliente de un betún elastomérico modificado con áridos ofíticos seleccionados.

6. Conclusiones

En este artículo se describe, de manera resumida, una interesante línea de investigación sobre la ampliación de tableros de puentes de fábrica existentes, mediante losa volada, a partir de prelosas colaborantes cuya sección se completa posteriormente mediante el hormigonado in situ del espesor final de losa de reparto. Todo el artículo ha sido realizado en base a diversas actuaciones desarrolladas en la trayectoria profesional de autor.

Como conclusiones, ante la escasa información específica publicada al respecto, cabe destacar la importancia de continuar profundizando en su estudio, identificando las siguientes necesidades para el avance del conocimiento en esta parcela:

- Constitución de comisiones de trabajo con la participación de profesionales expertos en la materia, que puedan poner en común las diferentes experiencias y resultados de diseño, proyecto y ejecución.
- Redacción de futuras publicaciones y guías de recomendaciones, en las que se pueda reflejar más extensamente la casuística y tipologías de solución, así como la aportación de parámetros que ayuden a establecer criterios de elección adecuados,

ya que, aunque en la mayoría de los casos la solución de prelosas prefabricadas suele ser la más competitiva, en determinadas condiciones, puede ser preferible tener en cuenta soluciones de losa de hormigón "in situ".

- Integración del análisis portante y su adecuado funcionamiento al incrementar las cargas debidas a la ampliación del sistema que configura la subestructura de los puentes (bóveda y estribos), que a nivel de simplificación se ha determinado como hipótesis de partida. No obstante, otra interesante línea de investigación es la determinación de parámetros técnico-económicos en los casos en los que dicha bóveda plantea problemas, caso en el que, en ausencia de atributos histórico-culturales del puente, suelen estar abocados a su demolición para la posterior construcción de una estructura de nueva ejecución.
- Existe una gran casuística, de tremendo interés, que no ha podido ser plasmada en el presente documento (casos asimétricos con contrapesos, losas a media ladera, micropilotajes de ampliación, etc.), al tratarse de un artículo de introducción que plantea, a partir de uno de los casos más habituales y sencillos, la problemática general.
- En un gran número de casos, las soluciones de ampliación de puentes bóveda son aplicadas sobre estructuras con un cierto grado de valor histórico-cultural y/o sobre entornos de alta montaña de diverso grado de protección ambiental, por lo que, más allá de la funcionalidad alcanzada al incrementar la sección, debemos tener en cuenta los criterios ambientales y estéticos, utilizando materiales y acabados que respeten estas condiciones de contorno, desde la óptica de integración estética y medioambiental.

Por tanto, a pesar de haberse realizado muchas actuaciones de este tipo en nuestra geografía, tenemos pendiente de realizar una labor de reflexión, encuentro y sistematización del proceso, labor que ha despertado el interés del autor para la redacción de este documento, con algunas recomendaciones para la ampliación de tableros de puentes de fábrica mediante losa volada, esperando sea punto de partida de futura documentación que poco a poco, vaya analizando en profundidad las diversas líneas de investigación abiertas en esta materia.

10. Bibliografía

- [1] MARTÍNEZ, J.L.; MARTÍN-CARO, J.A.; LEÓN, J. (2001). "Comportamiento mecánico de la obra de fábrica. Monografía sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica". ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] DURÁN FUENTES, M. (2010). "Algunas cuestiones teóricas y prácticas sobre la reparación de los puentes de fábrica". I Congreso Internacional de Carreteras, Cultura y Territorio. CICCP de Galicia. La Coruña 3,4 y 5 de marzo de 2010.
- [3] MONLEÓN, S; DOMINGO, A.; LÁZARO, C. (2011). "Recuperación de puentes históricos". Dos ejemplos recientes: ampliación del puente de Estivella (2010) y ensanchamiento del puente de Sant Sadurní D'Anoia (2011).
- [4] MINISTERIO DE FOMENTO (2011). "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)". Dirección General de Carreteras. Serie Normativas.
- [5] MINISTERIO DE FOMENTO (2012). "Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red General del Estado". Dirección General de Carreteras. Serie Monografías. ❖