

Comportamiento dinámico en juntas transversales de estructuras tipo pérgola. Patologías observadas en la estructura PK 1+900 de la autovía A-8.

Dynamic behavior in transverse joints of type pergola structures. Pathologies observed in structure at PK 1+900 of the A-8 motorway.

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^a, Ricardo Rafael Pereira de Sousa^b, António Noriega Arena^c, Alvaro Gaute Alonso^d, José Francisco Sánchez Cimiano^e, Javier Mantilla Crespo^f

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. CEO. Universidad de Cantabria.

oramos@orramoseng.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. rpereira@orramoseng.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. anoriega@orramoseng.com

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. alvaro.gaute@unican.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria. Jefe de Servicio de Conservación y Explotación. jfscimiano@transportes.gob.es

^f Ingeniero Civil. MATINSA. Jefe de Operaciones. javier.mantilla.crespo@fcc.es

RESUMEN

La pérgola sobre el ferrocarril en la A8 (P.K. 1+900) es un tablero isostático de vigas prefabricadas de hormigón pretensado dividido en 6 tramos de luces de aproximadamente 30 m. En la junta entre dos de los tramos se produce una excitación dinámica significativa al paso de vehículos pesados, lo que se traduce en un importante deterioro de la junta de calzada y genera una preocupación por la posibilidad de un daño o deterioro estructural en las propias vigas. Se ha realizado una caracterización dinámica analítica y una campaña de auscultación dinámica para determinar el origen del problema y acometer una propuesta de actuación encaminada a dar continuidad total a la losa del tablero en la zona entre juntas de tramos.

ABSTRACT

The pergola over the railway on the A8 (P.K. 1+900) consists of an isostatic precast prestressed concrete beams bridge divided into 6 spans of approximately 30 m length. The joint between two of spans is subject to significant dynamic excitation from the passage of heavy vehicles, resulting in significant deterioration of the joint and raising concerns about the possibility of structural damage or deterioration to the beams themselves. An analytical dynamic characterization was carried out along with a dynamic auscultation campaign to determine the source of the problem and to propose the full continuity to the deck slab in the area between the joints of the sections.

PALABRAS CLAVE: patología, auscultación dinámica, cálculo dinámico, impacto, rehabilitación

KEYWORDS: pathology, dynamic auscultation, dynamic calculation, impact, rehabilitation

1. Introducción

La pérgola sobre el ferrocarril en la A8 P.K. 1+900 consiste en un tablero isostático de vigas

de hormigón pretensadas con un ancho total de 178 m. La estructura está dividida en 6 tramos

(28.39 m-29.95 m-29.95 m-29.96 m-29.77 m-29.83 m) por juntas de dilatación longitudinal. Los tramos se nombran: Tramo 1, Tramo 2A, Tramo 2B, Tramo 3, Tramo 4A y Tramo 4B.

El tablero está formado por un total de 77 vigas prefabricadas pretensadas de 1.00 m de canto, con separación variable entre 2.375 y 2.490 m, con una luz entre apoyos variable entre 20.28 y 20.51 m y unas culatas de 0.25 m, lo que da lugar a una longitud total de vigas de 29 m aproximadamente. Las vigas tienen un ancho de cabeza superior de 1.00 m y un ancho de cabeza

inferior de 0.60 m y se corresponden con las vigas tipo I-100-A-100.

Sobre las vigas se dispone una losa de hormigón armado ejecutada “in situ” con un canto mínimo de 0.25 m. Esta losa se hormigonó sobre prelosas de hormigón prefabricado de 6 cm de espesor colocadas entre vigas. La losa no cuenta con voladizos entre tramos, pues las vigas extremas de cada tramo están adosadas, de manera que en esa zona la losa se hormigonó directamente sobre el ala superior de las vigas.

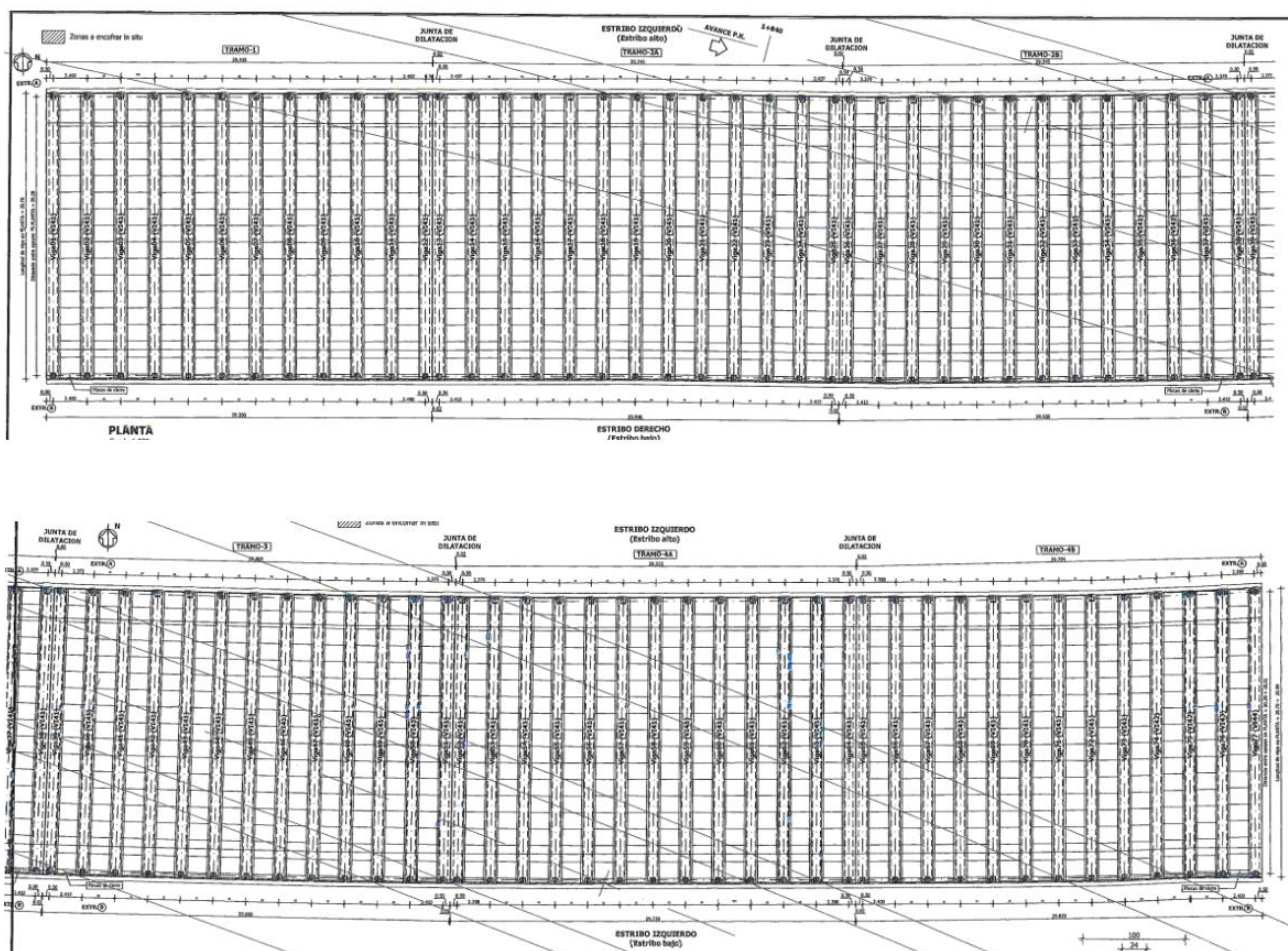


Figura 1. Planta de la estructura.

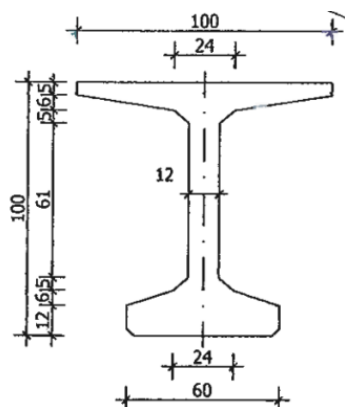


Figura 2. Geometría de la viga I-100-A-100.

En cuanto a la subestructura, el tablero se apoya en sendos estribos sobre apoyos de neopreno de dimensiones 250x300x41 mm. Los estribos tienen un ligero desarrollo curvo en planta despreciable a efecto de cálculo de la estructura. Los estribos son de cimentación directa con zapata corrida de 3 metros de longitud y 1 metro de canto. Los muretes de guarda son de 1.40 metros de alto y 0.30 metros de espesor. Con el fin de proveer de suficiente gálibo vertical para la línea de ferrocarril que discurre por debajo del tablero, los estribos se apoyan sobre terreno contenido por sendos muros de tierra armada.

Durante los trabajos de Conservación y Mantenimiento que desarrolla MATINSA, en conjunción con la propia Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria, se ha constatado que entre los Tramos 2A y 2B se produce una excitación dinámica significativa al paso de vehículos pesados en la calzada dirección Bilbao. También se observaron excitaciones dinámicas de menor magnitud en la calzada dirección Torrelavega entre los Tramos 3 y 4A. Asimismo, la junta entre los Tramos 2A y 2B muestra importantes signos de deterioro en la posición de las ruedas al paso de los vehículos que obligaba a campañas de reparación continua. Además de la lógica afección al confort de la circulación, existe preocupación por la posibilidad de un daño o deterioro estructural en las propias vigas.



Figura 3. Signos de deterioro en la junta entre los Tramos 2A y 2B.

2. Inspección y Auscultación

2.1 Inspección Visual

Entre los meses de julio y agosto de 2023 se llevan a cabo varias inspecciones visuales de la estructura de la pérgola (fundamentalmente de las vigas y de los apoyos) para tratar de verificar, en primer lugar, la existencia de algún daño estructural visible que explique la causa de la patología, o bien que sea consecuencia de ella.

Las inspecciones se realizaron tanto de la parte superior del tablero como de la parte inferior de la superestructura y subestructura (tras el oportuno corte del tráfico ferroviario bajo la vía). Las inspecciones visuales se hicieron con la cercanía apropiada para poder distinguir, en su caso, la existencia de fisuración en las vigas de hormigón pretensado.

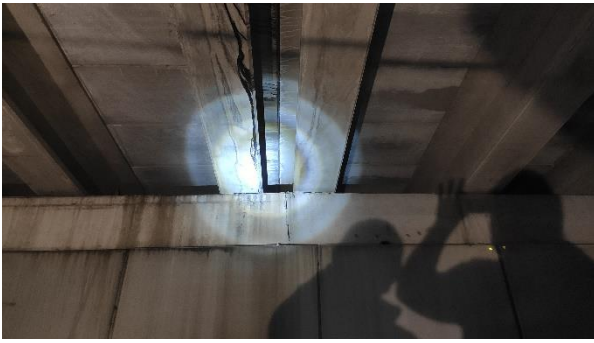


Figura 4. Filtración de betún por la junta de dilatación entre Tramos 2A y 2B.

Tras las inspecciones visuales se concluye lo siguiente:

- No se observa daño estructural en ninguno de los elementos portantes de la estructura visible. Losa y vigas no presentan signos de deterioro más allá de la presentación de manchas propias de la edad de la estructura.
- Los apoyos se encuentran en buen estado y no presentan deformaciones excesivas.
- Si bien las cimentaciones y subestructura no se inspeccionaron por estar ocultas tras un muro de tierra armada, no existe aparente pérdida de verticalidad de dicho muro que podría significar giros en las cimentaciones. Además, no se observaron signos de asentos.
- En la junta entre los Tramos 2A y 2B se muestran manchas negras en las superficies de hormigón debido a la percolación del betún durante la reinstauración del firme.

Asimismo, se observan porciones pequeñas de firme a nivel de las vías con el motivo de su desintegración por el daño ocasionado por el paso de los vehículos.



Figura 5. Condición actual de los aparatos de apoyo sin deterioro ni deformaciones significativas

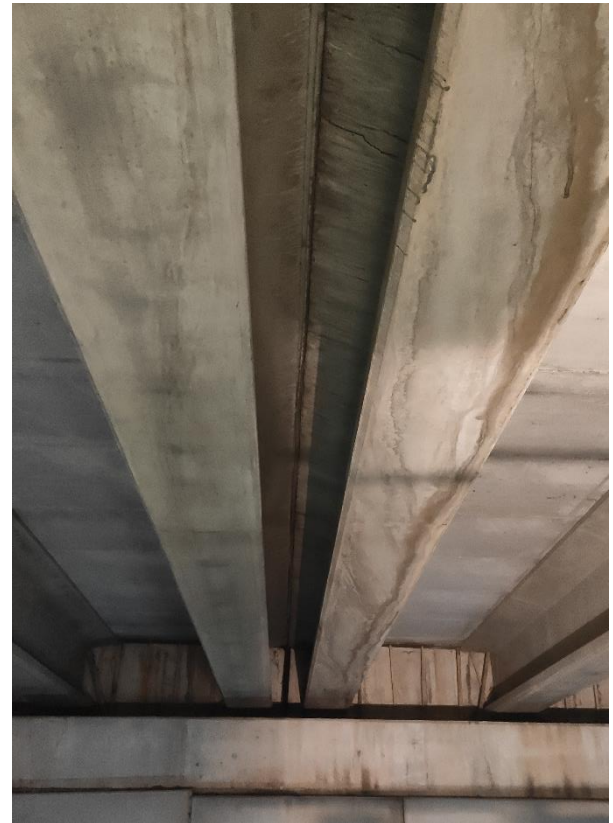


Figura 6. Estado general de la fascia inferior de las vigas pretensadas sin fisuración aparente. Manchas en los paramentos de hormigón propias del envejecimiento de la estructura.

2.2 Campaña de auscultación dinámica

Habida cuenta de las características intrínsecamente dinámicas de la patología observada se decidió realizar una campaña de auscultación dinámica de la estructura. Los objetivos de esta auscultación son varios:

- Cuantificar la magnitud de las aceleraciones en la zona de la junta.
- Comparar los parámetros dinámicos propios de los diferentes tramos de la pérgola, para poder descartar una degradación de la rigidez o alteración sustancial del amortiguamiento entre las diferentes zonas.
- Correlacionar los parámetros observados con los obtenidos de un modelo de cálculo.

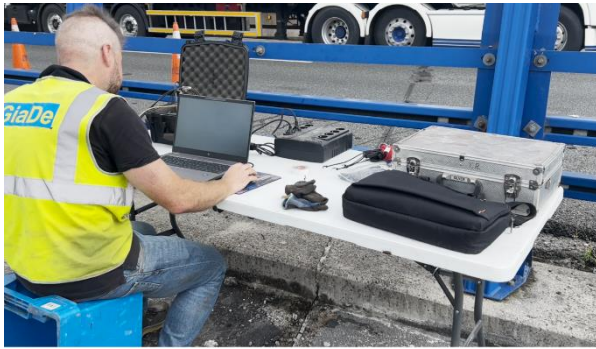


Figura 7. Registro al paso de vehículo pesado sobre la junta.

Los trabajos fueron realizados por el Grupo de Instrumentación y Análisis Dinámico de Estructuras de Obra Civil (GiaDe) de la Universidad de Cantabria. Para llevar a cabo la auscultación dinámica se dispusieron varios acelerómetros en diferentes partes de la estructura, obteniendo los siguientes parámetros:

- Frecuencias y modos de vibración.
- Coeficientes de amortiguamiento de la estructura.
- Aceleraciones y velocidades máximas al paso de tráfico pesado.
- Estimación de flechas dinámicas experimentadas al paso de tráfico pesado

Se realizaron 15 registros dinámicos de aceleraciones, de duración variable. Estos registros han permitido analizar el comportamiento dinámico de la estructura en la proximidad de 3 de sus juntas de dilatación:

- Junta de dilatación entre los tramos de tablero 2A y 2B, calzada sentido Bilbao.
- Junta de dilatación entre los tramos de tablero 1 y 2A, calzada sentido Bilbao.
- Junta de dilatación entre los tramos de tablero 2B y 3, calzada sentido Torrelavega.



Figura 8. Acelerómetros instalados en la junta entre el Tramo 2A y 2B.

Tras el análisis de los datos obtenidos en la campaña de auscultación dinámica, se observa que, debido a la naturaleza del impacto del tráfico pesado en las juntas de calzada, los modos de vibración que más se amplifican son los modos de vibración 2 y 3. Las aceleraciones máximas se registran en la junta de la calzada entre los tramos de tablero 2A y 2B, con valores bastante elevados y que alcanzan picos en el entorno de 0.3 g – 0.7 g.

Tabla 1. Frecuencias de vibración de la estructura.

Tramo	Modo 1 (Hz)	Modo 2 (Hz)	Modo 3 (Hz)	Modo 4 (Hz)
Tramo 1	6.00	6.71	7.50	9.82
Tramo 2A	5.81	6.39	7.40	9.15
Tramo 2B	5.53	6.15	7.10	8.75
Tramo 3	5.80	6.19	7.24	8.86

Asimismo, las frecuencias de vibración y parámetros de amortiguamiento obtenidos para cada tramo de tablero al lado de la junta son similares a las obtenidas en los restantes tramos de la estructura.

Tabla 2. Factor de amortiguamiento estructural.

Tramo	Modo 1 (%)	Modo 2 (%)	Modo 3 (%)	Modo 4 (%)
Tramo 1	1.98	2.52	2.15	2.64
Tramo 2A	1.13	1.40	1.46	1.15
Tramo 2B	2.09	2.41	2.22	1.80
Tramo 3	0.93	1.97	1.98	2.15

2.3 Conclusiones y Diagnóstico

En relación con la determinación de las causas de la patología observada, los trabajos de campo llevados a cabo muestrearon ningún signo apreciable de daño estructural en los elementos estructurales de la pérgola, o un comportamiento diferencial de los tramos afectados del tablero frente a los otros, que pudieran estar ocasionando la patología observada.

Como parecía deducirse en un primer momento tras la propia visualización detallada del paso de los vehículos pesados a través de la junta, las elevadas aceleraciones medidas y los desplazamientos verticales relativos entre ambas partes de la junta obedecen al mecanismo natural de la acción de las cargas pesadas dinámicas sobre la discontinuidad que la junta de dilatación impone en la losa (agravado por el hecho de que, en los tramos en cuestión, el carril de vehículos pesados está situado prácticamente en el centro de luz de las vigas de la pérgola). Efectivamente:

- En la junta de dilatación entre los tramos 2A y 2B el carril derecho (carril de circulación de vehículos pesados) de la calzada dirección Bilbao está posicionado en el centro de vano de las vigas longitudinales. Esto ocasiona que los vehículos, al abandonar el tramo 2A y al entrar en el tramo 2B pasan de estar en una situación de flecha máxima (cargas en centro de luz) a una situación de flecha nula (vano no cargado).

- Se produce un abandono brusco de la rueda desde el tramo anterior al vano posterior,

equivalente a una fuerza de impacto, con consecuencia de aceleraciones altas y una oscilación del tablero significativa.

- Esta diferencia de flechas entre tramos adyacentes provoca un salto en la superficie de rodadura, que es lo que provoca un impacto de la rueda contra el vano posterior. Impactos sucesivos van deteriorando el firme, conllevando a su desintegración y generando un mayor “escalón” entre ambas partes de la junta.

Para corroborar de manera analítica estas conclusiones, y poder establecer una propuesta de actuación que mitigue el fenómeno observado, se ha realizado un modelo de cálculo, tal como se detalla a continuación.

3. Análisis Dinámico

3.1 Modelo de cálculo

Se ha realizado un modelo de elementos finitos con el fin de comparar los datos obtenidos en la campaña de auscultación dinámica con el comportamiento teórico de la estructura.

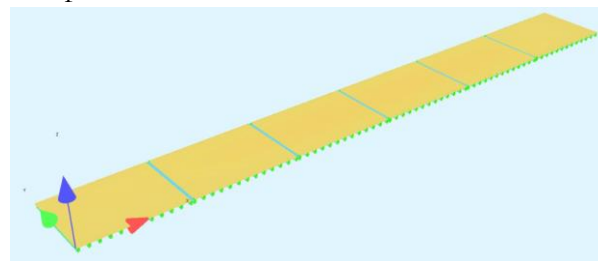


Figura 9. Imagen 3D del modelo de cálculo.

El modelo realizado consiste en un modelo híbrido viga-losa con límites en los apoyos; esto es, la subestructura no se ha representado. Se ha representado el eje real de la carretera, con su curvatura en planta y sus carriles, con el fin de obtener un resultado que se pueda asemejar lo máximo posible a la realidad. Se han representado los 6 tramos y las juntas entre ellos.

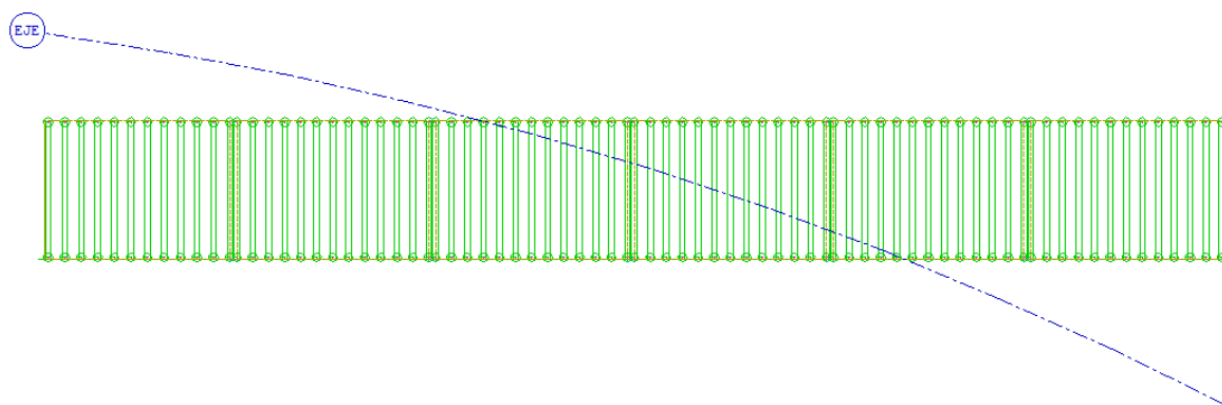


Figura 10. Planta del modelo, con eje longitudinal de la calzada.

3.2 Frecuencias propias de vibración

En primer lugar, mediante la comparación de los modos propios de vibración se puede inferir si la estructura ha perdido rigidez como consecuencia de daño estructural. Para la obtención de los modos propios se han considerado todas las cargas muertas sobre la estructura (firme y barreras). Además, se ha ajustado la rigidez del hormigón a la edad y un valor de módulo de elasticidad del hormigón igual al instantáneo. Las frecuencias propias de vibración obtenidas del modelo son las siguientes:

Tabla 1. Frecuencias de vibración calculadas.

Tramo	Modo 1 (Hz)	Modo 2 (Hz)	Modo 3 (Hz)
Tramo 1	5.77	6.01	6.57
Tramo 2A	5.55	5.78	6.31
Tramo 2B	5.40	5.62	6.14
Tramo 3	5.45	5.67	6.19

Se muestran a continuación los 3 primeros modos propios de flexión del Tramo 2B. Debido a la similitud con el resto de los tramos, la forma de los modos propios del Tramo 2B se pueden hacer extensivos al resto de tramos.

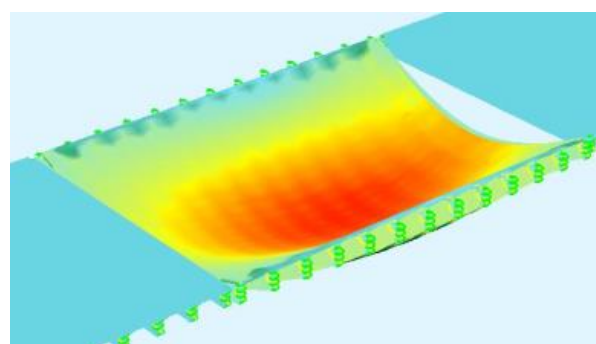


Figura 11. Forma del modo 1 ($f=5.40$ Hz) del tramo 2B.

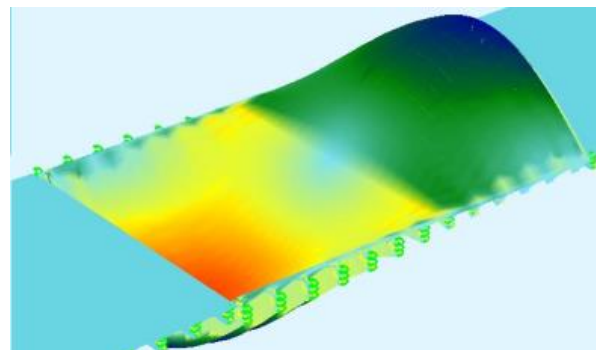


Figura 12. Forma del modo 2 ($f=5.62$ Hz) del tramo 2B.

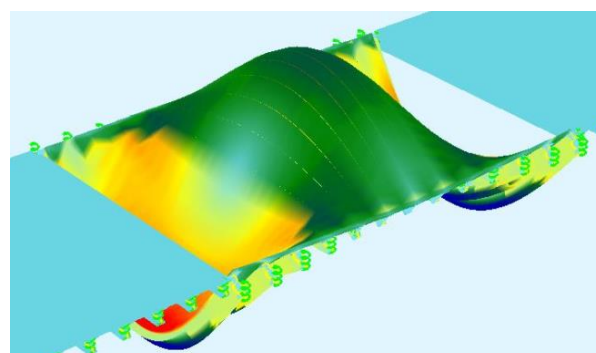


Figura 13. Forma del modo 3 ($f=6.14$ Hz) del tramo 2B.

Las frecuencias propias de vibración tienen una correlación bastante aceptable con respecto a los valores deducidos de la auscultación dinámica (con valores algo inferiores en el modelo de cálculo que puede deberse a una ligera infravaloración de la rigidez real de la estructura o a un pequeño exceso en la consideración de la masa vibrante).

3.3 Respuesta Dinámica frente al tren de cargas

Se ha realizado un análisis dinámico de la estructura para comprobar cuál es la respuesta teórica al paso de un vehículo pesado tipo. El vehículo empleado es un camión de 38 t con distribución entre ejes como se muestran a continuación.

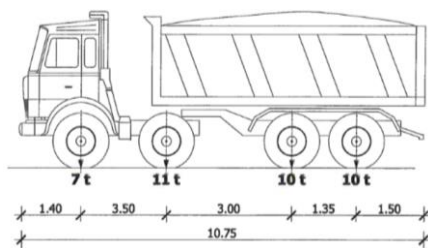


Figura 14. Vehículo pesado tipo utilizado para en el análisis dinámico.

Las velocidades de recorrido son de 60-70-80-90 km/h. Se han empleado los coeficientes de amortiguamiento estructural obtenidos en la campaña de auscultación dinámica.

Para este análisis dinámico se ha puesto énfasis en el comportamiento de la viga de borde del Tramo 2A, anterior al Tramo 2B.

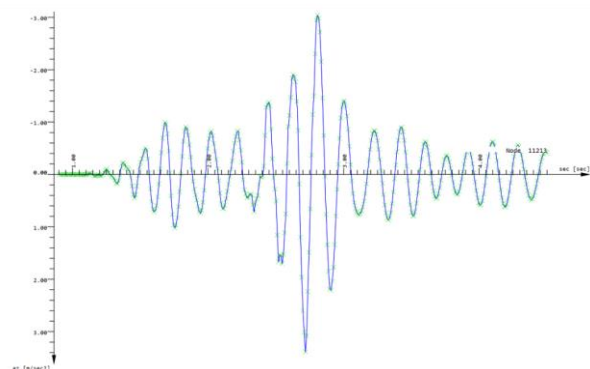


Figura 15. Aceleraciones (m/s^2) del punto de centro de luz de viga 25 en el Tramo 2A. Velocidad de 80 km/h.

La máxima aceleración obtenida en el cálculo dinámico es de unos 3.4 m/s^2 aproximadamente para una velocidad de 80 km/h. Esta aceleración está en el rango de las aceleraciones medidas en campo, donde se registraron valores de aceleración en el Tramo 2A en el acelerómetro 1 del entorno de 3.1 a 4.2 m/s^2 .

En cuanto a las flechas calculadas, la máxima flecha dinámica registrada es de unos 5.2 mm aproximadamente para una velocidad de 60 km/h. Esta flecha es algo mayor que la deducida de la auscultación dinámica en campo, donde se registró el valor de flecha dinámica de 1.5 mm, pero en el orden de los valores observados mediante otras medidas directas realizadas al paso de vehículos, como se muestra a continuación:



Figura 16. Flecha dinámica medida durante una inspección visual al paso de un vehículo con eje tándem del orden de 5mm.

4. Propuesta de actuación

4.1 Descripción de la actuación

Una vez analizado y caracterizado el problema, que es derivado de la propia configuración del diseño de la estructura, y no de una posible patología asociada a las vigas, losa o subestructura, la propuesta de actuación realizada consistió en una solución de eliminación de la junta dando continuidad total a la losa del tablero en la zona entre juntas de tramos.

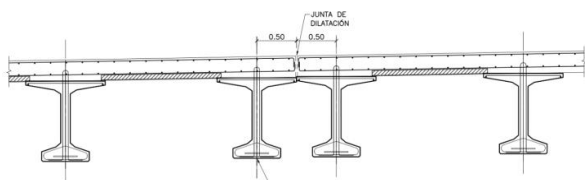


Figura 17. Sección actual en zona de juntas.

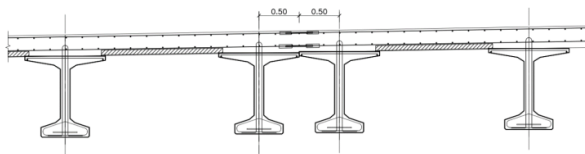


Figura 18. Propuesta de continuidad de junta en tramo 2ª-2B.

El procedimiento de actuación fue el siguiente:

- Hidrodemolición de losa in-situ a 35 cm a cada lado de la junta de dilatación entre tramos 2a-2b. Se prestó especial cuidado en no provocar alteración de la superficie de la viga, limitándose la hidrodemolición solo a la losa.

- Corte de la armadura transversal dejando esperas de 18 cm de longitud. Instalación de barras de acero inoxidable mediante pareja de acopladores.

- Reinstalación de la armadura longitudinal de la losa.

- Hormigonado de losa con recrecido dejando un recubrimiento mínimo de 35 mm desde superficie de acoplador. Uso de mortero tixotrópico clase R4 o características similares.

- Extendido de firme hasta cota de rasante original.

Para mejorar la durabilidad de la unión se emplearán barras de acero inoxidable de calidad EN 1.4301 (AISI 304) según UNE-EN 10088:2015.

Se ha definido una distancia de hidrodemolición que solo descabezaba una parte de la viga de borde, manteniendo la transmisión de esfuerzo rasante entre losa y viga y tratando de mantener la máxima cabeza de compresión posible.

Siendo la junta entre los tramos 2A y 2B la que más excitación dinámica presenta (por coincidir los carriles de tráfico pesado con la

posición de centro de luz de las vigas), se propone realizar la actuación en esta junta.

Desde el punto de vista de las deformaciones impuestas, resultan ahora tramos continuos de una longitud aproximada de 60 m (frente a los 30 m de la solución de proyecto). Habiéndose desarrollado ya la mayor parte de la retracción de la losa, y no habiendo deformaciones longitudinales por fluencia, las deformaciones transversales en los apoyos son asumibles. En cualquier caso, se procuró realizar el hormigonado de las juntas a temperaturas alejadas de las extremas.

4.2 Justificación de la solución propuesta

Sobre el modelo de cálculo empleado en el análisis dinámico se ha dado continuidad completa a la losa en las juntas entre los Tramos 2A y 2B.

Hay que hacer notar, como ya se ha comentado, que debido al hormigonado continuo de losas adyacentes la longitud de dilatación de la losa variará, pasando de 6 tramos simples a 2 tramos simples y 2 dobles con la distribución 1-2-1-1-1.

Se ha desarrollado un modelo evolutivo en el que el peso propio, cargas permanentes y reología desde el momento de construcción de la estructura hasta la fecha actual actúan sobre una estructura con juntas. Posterior al hormigonado de las juntas se introducen las cargas vivas según la IAP-11. Las cargas vivas relevantes para el estudio de la losa son las cargas de tráfico y las térmicas.

En cuanto a los esfuerzos locales longitudinales de la nueva porción de losa hormigonada, esta descansa sobre las alas de las vigas de borde, por lo que los momentos longitudinales locales son prácticamente nulos y el esfuerzo cortante en la losa prácticamente despreciable.

El estudio de la capacidad estructural de losa con juntas hormigonadas se ha realizado mediante la comparación de esfuerzos entre el modelo representativo con la configuración

inicial antes de la actuación y la configuración final después de realizada la actuación propuesta con las 2 de las juntas hormigonadas.

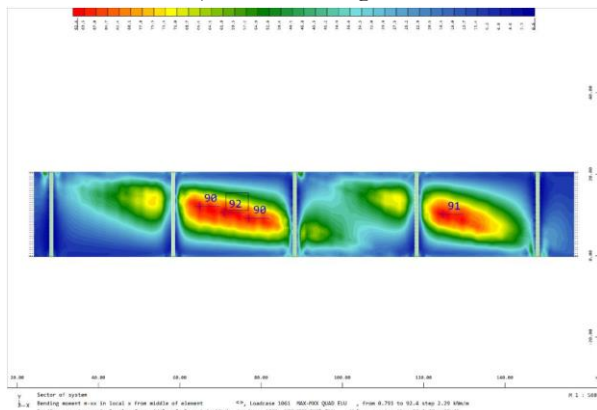


Figura 19. Máximo momento transversal en la losa en ELU. Configuración inicial antes de la actuación.

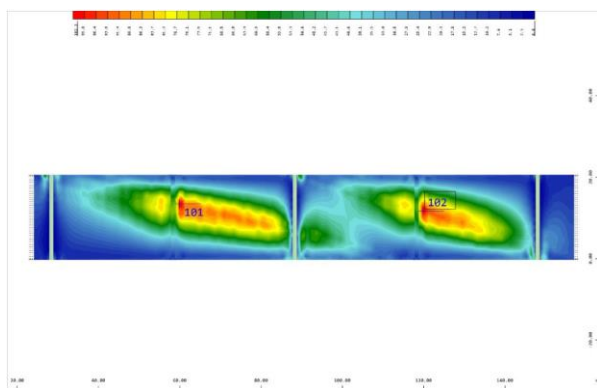


Figura 20. Máximo momento transversal en la losa en ELU. Configuración final después de realizada la actuación propuesta.

4.3 Análisis dinámico de situación final después de realizada la actuación propuesta

Se ha repetido el análisis dinámico descrito en el apartado 4.2 con las juntas hormigonadas con el objetivo de comparar la respuesta dinámica de la estructura durante el paso de un vehículo tipo. La máxima aceleración registrada es de unos 0.60 m/s^2 aproximadamente para una velocidad de 80 km/h . Se cuantifica la reducción en aceleraciones verticales teóricas en un 82% aproximadamente (de 3.4 m/s^2 a 0.60 m/s^2) lo cual resulta satisfactorio.

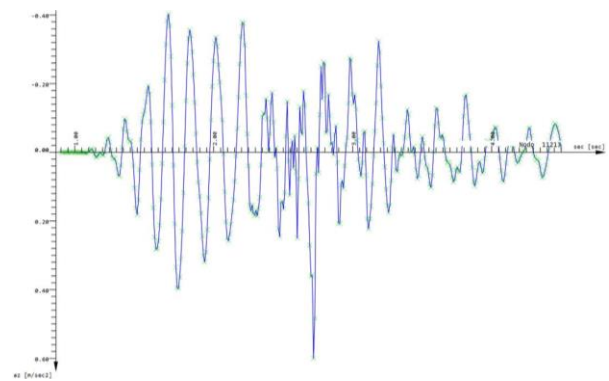


Figura 21. Aceleraciones (m/s^2) en centro de luz de viga 25 en el Tramo 2A. Velocidad de 80 km/h .

La máxima flecha ocurre para una velocidad de 90 km/h y es igual a 3.21 mm . Comparando las flechas dinámicas con las estáticas se comprueba cómo el factor de amplificación dinámica es prácticamente igual a 1.0 . Este resultado confirma que la respuesta dinámica teórica de la estructura mejoraría drásticamente si se adoptase la solución propuesta.

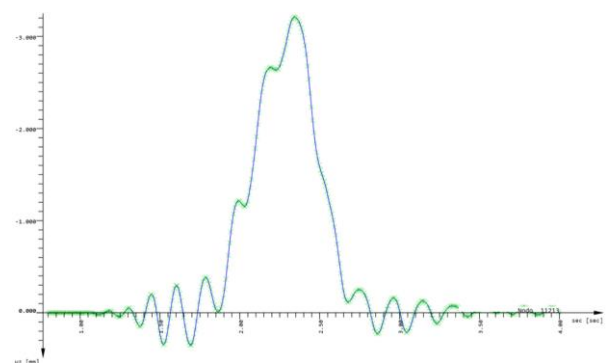


Figura 22. Flechas (mm) en centro de luz de viga 25 en el Tramo 2A. Velocidad de 90 km/h .

En cuanto al momento flector en las vigas de borde, se presenta la comparativa para 70 km/h entre el camión tipo dinámico, el camión tipo estático y el carro de 60 toneladas. Se observa cómo el factor de amplificación dinámica se reduce drásticamente respecto al teórico que tendría en la situación antes de la actuación y sería prácticamente igual a 1.0 .

En cuanto a los cortantes, se comprueba que el cortante transversal en la losa de unión de juntas al paso de vehículos dinámicos es bajo. Asimismo, en el resto de las porciones de losa no existe incremento respecto a la situación con juntas longitudinales.