

PUENTES INTEGRALES Y SEMI-INTEGRALES DE FERROCARRIL

INTEGRAL AND SEMI-INTEGRAL RAILWAY BRIDGES

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
 Presidente de ESTEYCO. Miembro de la Academia de Ingeniería.
 Académico Correspondiente de la Real de Bellas Artes de San Fernando. ruiwamba@esteyco.es

RESUMEN: Los puentes integrales para carreteras, en los que se prescinde de aparatos de apoyo y de juntas de dilatación, se están utilizando crecientemente en diferentes países, por las ventajas que desde la perspectiva de la funcionalidad, de la coherencia estructural y de las tareas de mantenimiento ofrecen. En el texto se exponen conceptos e ideas relacionadas con las posibilidades que ofrece el monolitismo estructural en puentes ferroviarios y se relacionan aspectos que requieren un diálogo fructífero entre especialistas.

PALABRAS CLAVE: ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA, PUENTES INTEGRALES, INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA, MONOLITISMO ESTRUCTURAL

ABSTRACT: Integral road bridges, which eliminate abutment bearings and expansion joints, are being increasingly employed in various countries due to the advantages provided in terms of function, structural coherence and maintenance. This article sets out various concepts and ideas regarding the possibilities offered by these monolithic structures for railway bridges and underlines those aspects which require further debate by bridge specialists.

KEYWORDS: HIGH SPEED RAILWAY, INTEGRAL BRIDGES, SOIL-STRUCTURE INTERACTION, MONOLITHIC STRUCTURE

1. PREÁMBULO

Quien esto escribe colaboró hace algunos años con la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en la preparación de una "Guía para la concepción de puentes integrales de carreteras". En dicho documento, a la luz de numerosas experiencias internacionales que han sido ampliamente difundidas a través de publicaciones especializadas, se analizan las posibilidades y ventajas de construir puentes monolíticos, sin aparatos de apoyo y sin juntas de dilatación, a los que se ha dado en llamar genéricamente "Puentes integrales".

Desde que se publicó la Guía citada –y aún antes– se han construido un conjunto de puentes integrales de carreteras que han cumplido con las expectativas que justificaron su elección [Fig 1]. El impresionante desarrollo de la Alta Velocidad en España, ha propiciado la construcción de viaductos de longitud moderada [Fig 2], en los que se ha buscado el monolitismo estructural y se ha prescindido de aparatos de apoyo y de juntas de dilatación.

Es natural, por tanto, que en un Congreso de esta naturaleza, recordemos los puentes integrales y semi-integrales y tengamos la oportunidad de plantear cuestiones que el monolitismo estructural y la sensibilidad del tren ponen de actualidad.

2. RECORDANDO QUÉ SON LOS PUENTES INTEGRALES Y SEMI-INTEGRALES

Un puente integral se caracteriza por su monolitismo. El tablero se empotra directamente en las pilas. Sin intermediarios. La silla del estribo es prolongación y remate del tablero y se puede cimentar en pilotes metálicos hincados, muy flexibles transversalmente. Los empujes horizontales provocados por las tierras y las sobrecargas, se difunden de un estribo a otro a través del dintel.

La losa de transición, particularmente recomendable en este tipo de estructuras, es prolongación del tablero y puede estar monolíticamente unida a él. Así, la frontera entre la estructura y las tierras –en la que se suelen tradicionalmente disponer las juntas de dilatación– se aleja unos metros de la conflictiva zona por la delicada compactación de rellenos y por la incertidumbre del drenaje del agua que tiende a acumularse en el trasdós del muro.

Cuando en lugar de silla es necesaria la construcción de un estribo elevado, en un puente de moderada longitud, también se puede integrar el muro frontal del estribo en el tablero [Fig 3]. Para evitar la coacción indeseable que impondría a los movimientos del tablero, las aletas se independizan del muro, por medio de juntas verticales. Los muros fron-

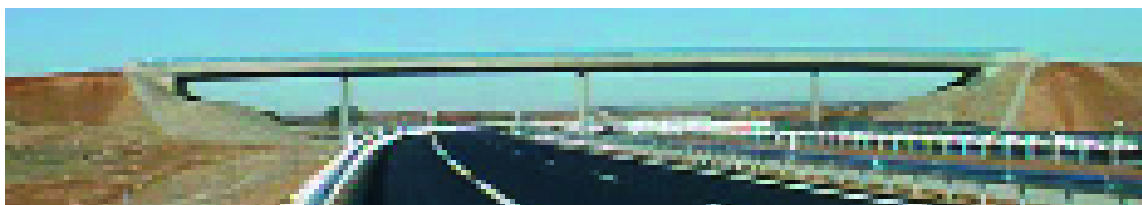


Fig. 1. Paso superior en la Autovía Madrid-Valencia.

tales, al estar empotrados en la cimentación y en el tablero, pueden ser muy esbeltos sin perder su capacidad para transmitir los empujes de tierra en parte al tablero y en mayor medida al cimientto.

En otras ocasiones, por ejemplo cuando la silla del estribo descansa sobre un terreno poco deformable, puede tener más lógica ingenieril disponer un aparato de apoyo bajo el extremo del tablero que se puede prolongar, monolíticamente –también en este caso– con la losa de transición. Esta concepción de la estructura justifica la denominación con que se les conoce: puentes semi-integrales.

Por asimilación se pueden conocer con la misma denominación a aquellos puentes en los que, por diversas causas –siendo la más frecuente la importancia de su longitud–, se disponen pilas monolíticamente empotradas al tablero, situadas hacia el centro de la obra, mientras que en otras, más próximas a los estribos, se disponen aparatos de apoyo cuya elección y dimensionamiento constituyen una de las tareas más ingenieriles del proyecto de un puente. Entre unos y otros tienen que transferir las cargas verticales y horizontales al terreno, sin coaccionar significativamente el libre movimiento del tablero bajo las deformaciones impuestas.

3. LA NOVEDAD DE LOS PUENTES INTEGRALES O SEMI-INTEGRALES

Llegados a este punto, conviene resaltar que el concepto de puente integral y, aún más el del puente semi-integral, no es nuevo. Hay quien dice que solamente lo es aquello que se ha olvidado. Y, por ello, no está demás que recordemos

que hasta la Revolución Industrial todos los puentes de mampostería eran integrales [Fig. 4], sin aparatos de apoyo ni juntas de calzada. Que, en los orígenes, muchos puentes de hormigón armado lo eran también. Las peculiaridades de los puentes decimonónicos de acero propiciaron la creación de aparatos de apoyo metálicos e hicieron proliferar las juntas... sin juntas específicas o con dispositivos rudimentarios para contener el balasto junto al estribo del puente. La revolucionaria invención del hormigón pretensado disparó las deformaciones de los tableros y exigió un conocimiento mucho más preciso del comportamiento de los materiales. No fue casualidad que Eugène Freyssinet, al que se deben las sutiles rótulas que llevan su nombre, concibiese los apoyos de neopreno y que, en el ámbito del pretensado, se desarrollasen también las juntas de calzadas y los gatos planos.

Es también cierto que el monolitismo pila-tablero que caracteriza los puentes integrales y semi-integrales es más difícil de alcanzar con soluciones prefabricadas e imposibles si se utiliza el procedimiento constructivo de los tableros empujados. En el caso de los puentes mixtos puede ser, asimismo, problemático plantear nudos rígidos. Aunque, por otro lado, tenemos cerca algunos puentes emblemáticos que son una loa a la integridad ingenieril y estructural [Fig 5].

En todo caso, al seleccionar tipologías y sistemas constructivos que impiden el monolitismo de la pila y el tablero, se debe ser consciente de los inconvenientes que conlleva la decisión. Y, entre ellos, la mutilación estructural que desaprovecha la potencial capacidad de las pilas y sus cimientos para transmitir los importantes esfuerzos de frenado que genera el ferrocarril, lo que obliga, en ocasiones a construir estribos mastodónticos dimensionados para absorber dichos

Fig. 2. Viaducto integral L.A.V. Tramo: Madrid-Zaragoza.

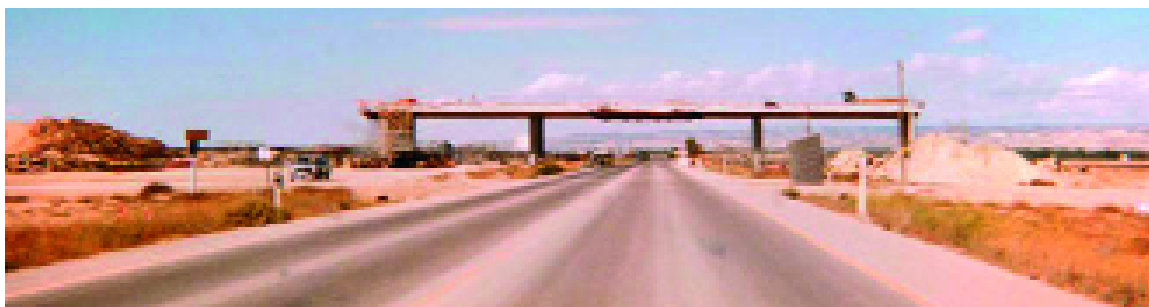




Fig. 3 Estribo integral L.A.V. Tramo: Madrid-Zaragoza

empujes. O el gran canto del tablero y el incremento del pretensado que imponen las soluciones empujadas o las soluciones isostáticas prefabricadas. De lo que resultan, algunas veces, puentes descuartizados que recuerdan más a dólmenes megalíticos que a estructuras para un transporte del siglo XXI [Fig 6].

4. LA PROBLEMÁTICA DE LOS PUNTES INTEGRALES Y SEMI-INTEGRALES

Se puede considerar, fundadamente, que para longitudes de tableros reducidas, con geometrías no torturadas por grandes esviajes o marcadas curvaturas, en terrenos apropiados, los puentes sin aparatos de apoyo y sin juntas de calzada, se pueden comportar de forma muy satisfactoria.

Conviene señalar, por otra parte, que algunos de los titubeos que se perciben al abordar el dimensionamiento de los puentes integrales son comunes a todo tipo de puentes. En los que se desmenuzan con aparatos de apoyos y juntas solemos asumir incertidumbres que, a veces, se consideran intolerables en estructuras monolíticas.

Fig. 4. Puente Vecchio sobre el río Arno en Florencia. A la derecha, figura 5. Puente de Tortosa.



Reflexionar sobre el comportamiento de un puente integral exige rememorar y actualizar conocimientos sobre diversos aspectos esenciales de las estructuras. Y abre caminos de investigación e innovación en la ingeniería y objetivos docentes del mayor interés.

Además, en el caso de los puentes de FF.CC, se plantean específicamente cuestiones relacionadas con la transmisión de fuerzas horizontales de frenado y arranque, y las derivadas de la interacción vía-estructura.

5. LA SENSIBILIDAD DEL USUARIO DEL PUENTE

La espléndida primavera del ferrocarril, que ha gestado la alta velocidad, nos ha traído una pléyade de viaductos en los que –como su preciso nombre indica– se posará la vía. Tienen por vocación esencial que el tren circule sobre ellos volando que no pitando y sin que note su presencia (Fig. 7).

No es pequeño el reto. Aunque, por otra parte, es análogo al que nos planteamos en un puente de carretera, en una pasarela peatonal, en un acueducto o en la estructura soporte de un gasoducto... Enunciar así el problema que hay que resolver enfatiza la importancia del usuario del puente: del tren volador, del peatón, del coche, autobús o camión, del agua, o de las tuberías por las que discurre el gas.

Son abundantes las clasificaciones de los puentes atendiendo a su tipología, a los materiales utilizados, a la forma en que son construidos, a la geometría de su sección transversal. Pero hay una clasificación previa y relevante que está relacionada con las exigencias y sensibilidades del “usuario del puente”.

Las personas somos muy sensibles a las aceleraciones y somos, además, capaces de activar y amplificar vibraciones, cuando sintonizamos con una estructura a la que nuestra levedad peatonal ha podido convertir, fatalmente, en anoréxica [Fig. 8].

Los coches nacen con ingenios que amortiguan los cada vez más infrecuentes baches del camino; con motores sobredimensionados que reclaman puentes trazados con curvas y peraltes cuidadosamente escogidos; y pavimentos que hacen posible la circulación, al tiempo, veloz y segura.



Fig. 6. Puente desmenuzado.

El tren y su lecho –la vía– (carril, traviesa y balasto las más de las veces), tienen exigencias específicas que determinan la tipología y dimensiones del puente. La alta velocidad hace al tren muy sensible y las exigencias del viajero muy elevadas. En general, los requerimientos están establecidos en normas o especificaciones de proyecto del puente. En ellos, se establecen con sensatez y coherencia dos niveles de control de comportamiento: el preagónico estado límite último y el vital estado límite de servicio. En estado preagónico todos los puentes como las personas se parecen mucho y tienen análogas exigencias sobre las que existe un elevado grado de consenso.

No sucede otro tanto con las exigencias de servicio. Los ingenieros somos conscientes, por ejemplo, que las limitaciones de desplazamientos que se imponen en las normas no tienen bases muy sólidas. Sabemos, también, que este tipo de exigencias esconden unos deseables objetivos de robustez que limitan



Fig. 7. Puente de Ogatayama.

los riesgos asociados a las inevitables vibraciones del puente, que vibra porque está vivo: vivo... y coleando. Son limitaciones que se establecen porque otros puentes anteriormente contruidos con similares exigencias parecen haberse comportado correctamente.

Otro ejemplo es el relativo a los límites aceptables para la anchura de fisuras que se comparan con unos valores estimados en base a formulaciones que, en muchas ocasiones, tienen poco o nada que ver con las causas reales de las fisuras que se dibujan en las superficies de los hormigones estructurales que quedan a la vista.

Pero, en el fondo, esta situación manifiestamente, mejorable no suele afectar a nada esencial. Las exigencias de robustez no proscriben ninguna tipología estructural y, a veces, evitan algún desaguisado o, cuando menos, alertan de la posibilidad que ocurran.

El control de fisuración despierta, cuando menos, una sana preocupación por la calidad y la cantidad del armado pasivo o activo con el que transformamos al torpe hormigón en un despierto material estructural.

Sin embargo, en algunos casos, la aparente preocupación por la buena conducta del puente en servicio frustra posibilidades e impone soluciones ortopédicas cuajadas de juntas verticales y horizontales, que desmenuzan tableros y desolidarizan pilas y tableros, empeorando la seguridad del puente sin ser evidente que mejoren necesariamente su servicio.

Las deformaciones impuestas –pretensado, retracción y fluencia en el hormigón, variaciones de temperatura en todo tipo de estructuras– suelen ser el origen de preocupaciones que, en algunas ocasiones, imponen dictatorialmente soluciones discutibles e invalidan otras que lo son en menor medida.

Los puentes integrales y semi-integrales –la opción del monolitismo estructural en suma– exigen considerar las deformaciones impuestas en su concepción general, en su dimensionamiento y en el detalle, gestionando adecuadamente las incertidumbres inherentes al concepto y recordando que la ductilidad –puente sobre nuestra ignorancia–, es un atributo imprescindible con el que debemos gestar nuestras estructuras.

La respuesta estructural a las deformaciones impuestas despierta, en una mente estructuralmente bien educada, cuestiones como las limitaciones de los cálculos puramente elásticos o la importancia y dificultad de la interacción suelo-estructura, territorio fronterizo que suele resultar, con alguna asiduidad, más propenso a la confrontación que al diálogo.

6. LAS FRONTERAS DE LOS PUENTES

Tal vez, en un próximo futuro, el activo Grupo español del IABSE debería plantearse la convocatoria de otro Congreso

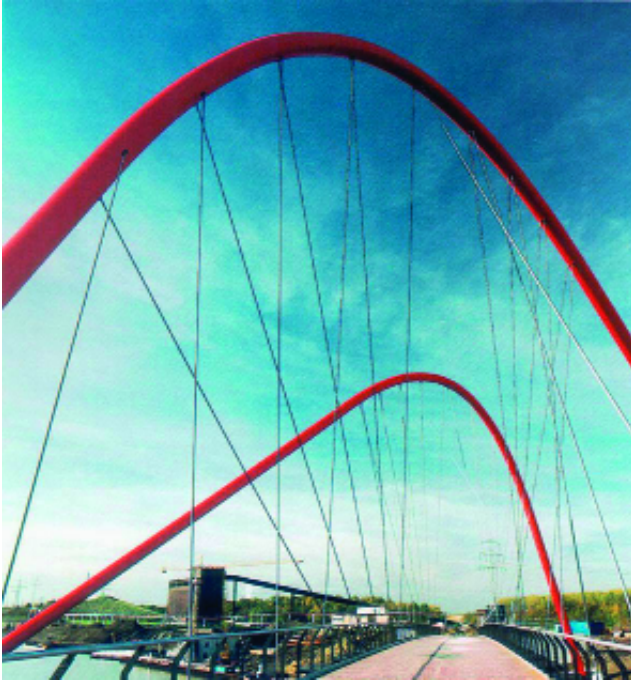


Fig. 8. Pasarela en Japón.

que podría denominarse “Las fronteras de los puentes”, para propiciar la reflexión y el diálogo entre especialistas de estructuras, de mecánica de suelos y de vías de ferrocarril, que tenemos que convivir en las tres fronteras que envuelven a la estructura del puente, cada una con sus peculiaridades propias: el diagnóstico de los problemas fronterizos y sus soluciones requiere la participación activa y dialogante de las tres especialidades.

Dos de las fronteras son comunes a todo tipo de puentes:

- a) La frontera entre estructura del cimiento y el suelo: ¿Qué cargas máximas se pueden transmitir entre la estructura y el suelo que está en contacto con ella? ¿Cuáles son los desplazamientos asociados a dicha transferencia de cargas?
- b) La frontera entre el terraplén o desmorte en el que descansa la vía y el tablero del puente contiguo: ¿Cuáles son los desplazamientos diferenciales que se pueden producir en la zona de encuentro entre el acceso a tierras y el puente? ¿Cuáles son las consecuencias y los límites de dichos desplazamientos?

Además, en el caso específico del ferrocarril existe una tercera y trascendente frontera: la que se produce entre la vía del ferrocarril (carril, traviesa y balasto) y el tablero del puente.

Existen todo un mundo de cuestiones que manifiestan la complejidad de la interacción terreno, estructura, vía, e identifican las tres fronteras o territorios que a veces suelen estar dominados por un tipo de especialistas y abandonados por los otros, cuando precisamente debían ser espacios de reflexión que conduzcan a acciones consensuadas. Y espacios, por otra parte, en los que se puede y se debe cosechar información esencial para comprender mejor los problemas, progresar en su solución y disponer de medidas objetivas que permitan evaluar el progreso.

7. ALGUNAS CUESTIONES ESTRUCTURALES QUE SE PLANTEAN EN LAS FRONTERAS DE LOS PUENTES INTEGRALES

7.1. RESPECTO A LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

El esencial conocimiento del terreno tiene por finalidad asegurar que los cimientos tienen capacidad para transmitir las cargas horizontales y verticales al terreno. Se trata de una condición de resistencia que, por coherencia, debe ser una comprobación de “estado límite último”. Además, en el estado límite de servicio hay que comprobar que los desplazamientos verticales y horizontales son compatibles con la funcionalidad de la obra y no producen, en las de hormigón, fisuraciones intolerables.

7.2. RESPECTO A LA INTERACCIÓN VÍA-ESTRUCTURA

Hasta hace unas décadas los carriles con geometrías decimonónicas se disponían por tramos de 12,00 metros, longitudes habituales de laminación. El romántico traqueteo del tren identificaba la posición de las juntas entre carriles. Todos los viajeros sentían la velocidad del tren por la frecuencia del traqueteo y los más curiosos e informados podían, con el apoyo de su reloj, precisar la velocidad de marcha.

Ahora ya no. El tren se ha vuelto silencioso. Ya son pocas las juntas en los carriles y se localizan en lugares estratégicos. Su longitud entre juntas ha pasado de los 12 metros a ser teóricamente ilimitada. El carril está traccionado o comprimido (con valores que son del orden del 12% del límite elástico del material 900 N/mm²) debido a las variaciones de temperatura, pero no se mueve excepto en los últimos ciento y pocos metros (próximos a los aparatos inevitables de dilatación) en los que el carril respira, suelta presión, transformando tensiones en deformaciones. La soldadura aluminotérmica convierte los ya largos carriles –que nacen en las maternidades siderúrgicas– en los “largos carriles soldados” por los que pueden circular, casi volar, los trenes en silencio.

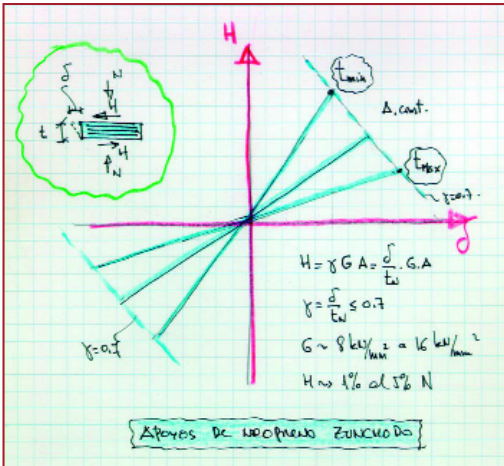


Figura 9. La rigidez de los "apoyos de neopreno".

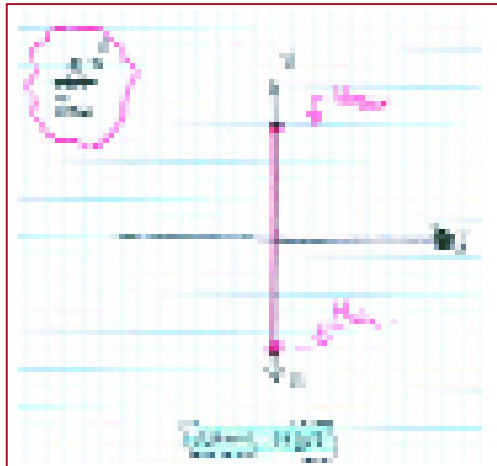


Figura 10. La rigidez de los "apoyos fijos".

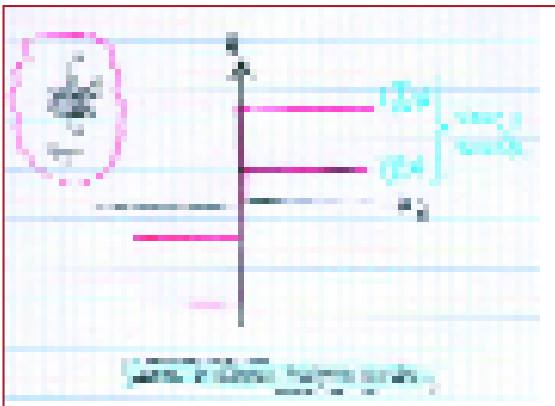


Figura 11. La rigidez de los "apoyos deslizantes".

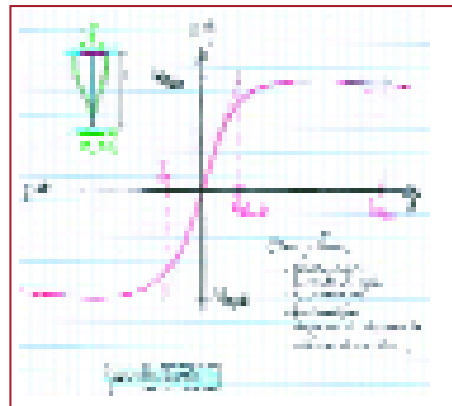


Figura 12. La flexibilidad de la "pila dúctil".

Pero los "largos carriles soldados", sin las indeseables juntas (¿carriles integrales?) pueden plantear problemas cuando se disponen sobre viaductos.

La movilidad del tablero del puente genera tensiones o desplazamientos, o las dos cosas simultáneamente. Lo que puede incrementar el riesgo de rotura frágil de los raíles; o provocar desplazamientos transversales funcionalmente inaceptables del carril comprimido (el impreciso pandeo coaccionado por el balasto que envuelve la vía); o modificar el perfil longitudinal de la vía aumentando impactos, perturbando el confort del viajero, desconsolidando el balasto y exigiendo un mantenimiento más frecuente y delicado.

El carril soldado es una estructura muy interesante que, hasta ahora, se ha estudiado en ámbitos profesionales aleja-

dos de la ingeniería de puentes y distantes de la ingeniería geotécnica tradicional. Ahora parece llegado el momento de compartir conocimientos, para comprender las preocupaciones de todos y encontrar entre todos soluciones adecuadas desde todos los puntos de vista.

7.3. RESPECTO A LA TRANSICIÓN TIERRAS-VIADUCTO

Tal vez sea la zona más problemática en la traza que recorre un tren. Y entre las que mayor atención exige a los responsables del mantenimiento.

Los asentamientos diferenciales en la transición tierras-viaductos pueden provocar alabeos excesivos en la vía, efectos dinámicos indeseables, la descompactación del balasto, so-

bretensiones en los carriles y desplazamientos intolerables. En puentes largos se suelen disponer, además, los delicados aparatos de dilatación en esta zona.

En los puentes modernos la utilización de cuñas específicas para la transición ha mejorado la situación, sin resolverla del todo. Entre otras cosas porque su ejecución en las proximidades del estribo puede ser compleja. Porque el agua es atraída hacia el muro del estribo y requiere un drenaje que no siempre es suficientemente eficiente. Porque los movimientos del estribo o del tablero contribuyen a degradar el balasto.

8. RIGIDEZ Y DUCTILIDAD DE SISTEMAS DE APOYO

A lo largo de todo el texto han ido surgiendo sistemáticas referencias a los conceptos esenciales de la rigidez y la ductilidad.

Me parece, por ello, conveniente presentar, en forma muy esquemática, unos diagramas de fuerzas horizontales –desplazamientos que, siendo bien conocidos conceptualmente, no suelen expresarse gráficamente–. Se refieren a los aparatos de apoyo (Fig. 9, 10 y 11) que más frecuentemente utilizamos. Pero he incluido también diagramas de un ele-

mento al que me gusta llamar “la pila dúctil” (Fig. 12), que aunque no se comercializa tienen un valor ingenieril incomparable.

En la práctica, las diferentes posibilidades que tenemos los ingenieros para solventar la transferencia de cargas horizontales al terreno y controlar la influencia de las deformaciones impuestas, se logra con la combinación de sistemas de apoyo. Lo que, ciertamente, refleja de nuevo la complejidad del proyecto de puentes y la creatividad que tiene que ir asociada.

9. COLOFÓN

El renacimiento del ferrocarril, que nos ha traído la alta velocidad, está fomentando el proyecto y construcción de numerosos viaductos que suelen ser, en general, de geometrías sencillas y de luces y alturas de pilas moderadas. Pero con exigencias funcionales específicas y exigentes que determinan su carácter. Las estructuras monolíticas suelen ser con frecuencia una solución posible y, por ello, deseable. Y una posibilidad para profundizar en la complejidad de estructuras con fronteras que deben ser espacios de diálogo entre ingenieros. ■

REFERENCIAS

–1. MARTIN P. BURKE, Jr. “*The Genesis of Integral Bridges*”. Concrete International, July 1996.
 –2. MARTIN P. BURKE, Jr. “*Bridge Deck Joints*”. NCHRP. Synthesis of Highway Practice, 141.
 –3. L.F. GREIMANN, A.M. WOLDE-TINSAE AND P.S. YANG. “*Skewed Bridges with Integral Abutments*”. Transportation Research Record 903.
 –4. EDMUND C. HAMBLY. “*Integral Bridge Abutment Details in Practice and in Theory*”. Transport Research Laboratory.
 –5. Design Manual for Roads and Bridges / U.K. Vol. 1, Section 3, Part 7 BA 57/95. “*Design for Durability*”.
 –6. HARVEY E. WAHLS. “*Design and Construction of Bridge Approaches*”. NCHRP, Synthesis of Highway Practice 159.
 –7. ROBERT E. ABENDROTH and LOWELL F. GREIMANN. “*Rational Design*

Approach for Integral Abutment Bridge Piles”. Transportation Research Record 1223.
 –8. ROBERT E. ABENDROTH, LOWELL F. GREIMANN, PATRICK B. EBNER. “*Abutment Pile Design for Jointless Bridges*”. Journal of Structural Engineering. Vol. 115, Nº 11, November 1989.
 –9. AMERICAN IRON and STEEL INSTITUTE. “*Why Integral Bridges*”. Steel Bridge Forum. Summer/Fall 1993.
 –10. D.D. GIRTON, T.R. HAWKINSON, L.F. GREIMANN. “*Validation of Design Recommendations for Integral-Abutment Piles*”. Journal of Structural Engineering. Vol. 117, Nº 7, July 1991.
 –11. ALAN A. SOLTANI, ANANT R. KUKRETI. “*Performance Evaluation of Integral Abutment Bridges*”. Transportation Research Record 1371.
 –12. AMDE M. WOLDE-TINSAE, LOWELL F. GREIMANN, PE-SHEN YANG. “*End-Bearing Pile in Joint less Bridges*”. Journal of Structu-

ral Engineering, Vol. 114 Nº 8, August 1988.
 –13. MOUNIR R. KAMEL, JOSEPH V. BENAK, MAHER K. TADROS, MOSTAFA JAMSHIDI. “*Application of Precast, Prestressed Concrete Piles in Integral Abutment Bridges*”. Fourth International Bridge Engineering Conference.
 –14. LOWELL F. GREIMANN, AMDE M. WOLDE-TINSAE. “*Design Model for Piles in Jointless Bridges*”. Journal of Structural Engineering, Vol. 114, Nº 6, June 1988.
 –15. AMDE M. WOLDE-TINSAE, LOWELL F. GREIMANN. “*General Design Details for Integral Abutment Bridges*”. Civil Engineering Practice, Fall 1988.
 –16. “*Manuel pour le Calcul en Plasticité des Constructions en Acier. (Juin 1978)*”. Centre Technique Industriel de la Construction Metallique. France.
 –17. “*Towards an Indicator of the Health Condition of Bridges*”. Piarc Committee on Road Bridges, World Road Association, 1996.