

Rehabilitación y refuerzo de puentes en nudo de Prievoz, en Bratislava

Rehabilitation and strengthening of bridges in Prievoz interchange, at Bratislava

José M Simón-Talero Muñoz^a, Ángel Carriazo Lara^c, Álvaro Mazariegos Borobio^c, Carlos Bajo Pavía^d, Luis Martín-Tereso López^e, Wojciech Wlodzimirski^f

^a Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado.

^b Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Director Técnico.

^c Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero de Proyectos.

^d Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. Jefe Área Estructuras obra civil

^e Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. Jefe Departamento Estructuras obra civil

^f Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. D4R7 ppp, Structures Design Manager.

RESUMEN

Dentro del proyecto de la nueva circunvalación de Bratislava D4R7 se incluye la rehabilitación y refuerzo estructural de 8 puentes del enlace de Prievoz, importante nudo vial que debe remodelarse para permitir la conexión de la nueva autopista R7 de acceso a la ciudad. Construidos en los años 80, su tipología es de cajón continuo postesado con luces de hasta 46m, excepto dos estructuras en la rotonda, definidas como una losa curva postesada de un único vano de 39m y canto variable, empotrado en los estribos. La actuación supone una rehabilitación integral para asegurar una vida útil de 100 años y su refuerzo estructural para adecuación al cambio normativo, según Eurocódigos y a la nueva norma sísmica eslovaca.

ABSTRACT

The works for the new Bratislava D4R7 beltway includes the rehabilitation and structural strengthening of 8 bridges of the Prievoz interchange, an important road junction that must be remodeled to allow the connection of the new HWY R7 to access the city. Built in the 80s, its typology is a continuous post-tensioned beam with span lengths up to 46m, except the two structures in the roundabout, defined as a post-tensioned curved slab 1-span 39m long and variable depth, embedded in the abutments. The works includes the integral rehabilitation to ensure a service life of 100 years and its structural strengthening to adapt them to the regulatory change, now according to Eurocodes and the new Slovak seismic code.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación, nudo viario, refuerzo, pretensado exterior, durabilidad

KEYWORDS: Rehabilitation, interchange, strengthening, unbonded prestressing, durability



Figura 1. Fotomontaje del nudo tras la remodelación, cortesía de NDS

1. Generalidades

El consorcio D4R7, fruto de un contrato PPP, construye en Bratislava la nueva autopista D4, que circunvala Bratislava por el sur entre las localidades de Jarovce (en la frontera con Austria) e Ivanka pri Dunaji, y la nueva autopista R7 que nace en Bratislava y discurre paralela al río Danubio por su margen izquierda, en dirección sudeste, hasta la localidad de Dunajská Streda, próxima a la frontera con Hungría. El contrato incluye la remodelación del enlace de Prievoz de la autopista E58, en el casco urbano de Bratislava, que permite la conexión de la nueva autopista radial R7 con los accesos a Bratislava.

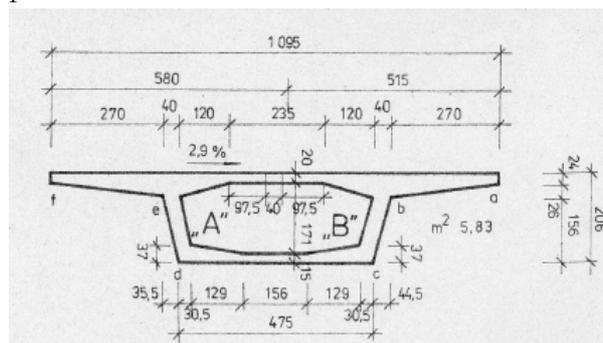
Este nudo consta actualmente de un elevado número de estructuras, de las cuales se actuará tan sólo en 8 de ellas, que pueden verse marcadas en amarillo en la figura 2, con una superficie total de tablero de unos 16.700 m².



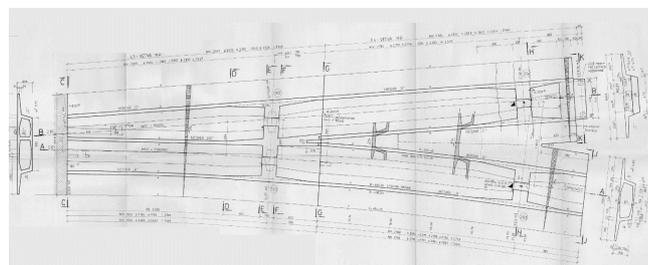
Dichas estructuras fueron construidas en los años 80 y actualmente presentan deficiencias desde el punto de vista de la durabilidad. Seis de estas estructuras, denominadas 211, 212, 213, 214, 215 y 218, responden a la tipología de viga cajón continua de hormigón postesado, con un canto constante de 2.06m, y luces de hasta 46m, mientras que las dos restantes: 216 y 217, que conforman una rotonda, son dos losas curvas aligeradas simétricas de hormigón postesado y un único vano de 39m de luz, empotrado en sus

extremos sobre los estribos. El canto es variable entre 1.35m en clave y 2.15 m en arranques.

Aunque la sección transversal típica de los puentes cajón es la de un cajón monocelular -ver figura 3. Los tramos de anchura variable se resuelven manteniendo la anchura de los voladizos y aumentando la anchura del núcleo del cajón, añadiendo almas centrales. Los tableros se apoyan sobre las pilas mediante una rótula plástica.



Los dos puentes de mayor longitud (211 y 213) incorporan tramos en pantalón, en “Y”, con anchura variable.



Dentro de la reordenación del nudo, junto a la ejecución de nuevas estructuras, resulta necesaria la actuación sobre estas estructuras existentes por un doble motivo:

- El contrato impone que las estructuras, ya sean nuevas o rehabilitadas, deben asegurar una vida útil de 100 años. Esto, añadido al mal estado de conservación en algunas zonas localizadas de las estructuras actuales, obliga a actuaciones de rehabilitación integral para mejorar sus condiciones de durabilidad.

- Asimismo también se impone que todas las estructuras del proyecto –ya sean de nueva construcción o rehabilitación de existentes– deben ser diseñadas de acuerdo a los Eurocódigos, tanto en lo relativo a las acciones a considerar como en las bases de diseño y dimensionamiento estructural. Además, las estructuras deben ser comprobadas y reforzadas si es necesario, para resistir las cargas del sismo correspondiente a la nueva normativa eslovaca, de la que resulta una acción sísmica superior a la considerada en el proyecto original.

Debido a la altísima densidad de tráfico soportada diariamente por el nudo de Prievoz, la concepción de las actuaciones ha venido también condicionada por la necesidad de minimizar la duración del periodo de corte del paso de vehículos sobre los tableros.

2. Trabajos previos de análisis

El primer paso previo al diseño de la actuación consistió en la recopilación de toda la información disponible sobre las estructuras, y a la ejecución de un intenso plan de inspecciones especiales sobre ellas.

Además de los planos “As built” de la construcción original, se ha tenido acceso a la información del refuerzo llevado a cabo en 1999 sobre las numerosas juntas a media madera entre tableros, que presentaban serios daños de fisuración. Estos refuerzos fueron de dos tipos:

- Cosido de las ménsulas de cada tablero mediante barras de acero pretensado

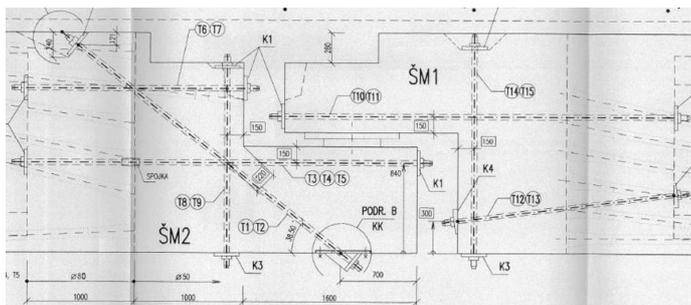
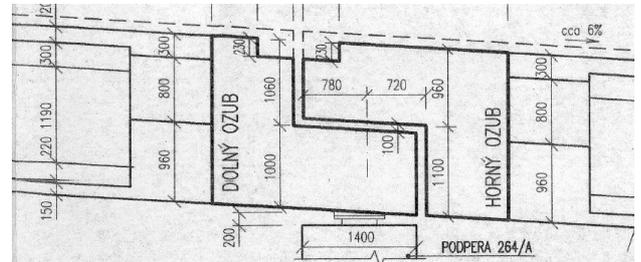


Figura 5. Esquema del refuerzo con barras pretensadas de juntas a media madera realizado en 1999

- Solución excepcional consistente en la ejecución de una pila adicional bajo la junta a media madera entre los puentes 211 y 218, al situarse en un área sin afección al tránsito.



Adicionalmente, se ha dispuesto de la información de informes de inspecciones periódicas realizadas sobre las estructuras previamente al inicio del contrato.

2.1. Plan de inspección de las estructuras

Se ha desarrollado un exhaustivo plan de inspección de las estructuras para la completa caracterización de sus materiales y su estado de conservación en la situación actual.

La inspección especial de las estructuras ha incluido los siguientes trabajos:

- Inspección visual con medios especiales de acceso, con preparación de mapas de daños definiendo detalladamente la localización y tamaño de los diversos daños observados: fisuraciones, signos de corrosión, coqueras, eflorescencias, etc. tanto de la cimentación, subestructura y superestructura (paramentos exteriores e interiores de todos los tableros).



Figura 7. Vista de típicos signos de corrosión en bordes y cara inferior de los voladizos de los tableros

- Campaña de ensayos no destructivos: caracterización de hormigones mediante esclerómetro, comprobación de recubrimientos mediante pachómetro magnético de alta precisión y preparación de mapas de potencial eléctrico. Estos ensayos, realizados en una fina malla 2x2m en todos los paramentos de hormigón, aportan información sobre su homogeneidad, profundidad del recubrimiento de las barras de armadura y sobre su condición actual de riesgo de corrosión. Estos ensayos se contrastan con catas en los tableros y los ensayos destructivos en puntos comunes.



Se ha comprobado el estado de los tendones y la inyección de protección dentro de las vainas mediante cámara endoscópica.

- Ensayos destructivos que permiten la caracterización cuantitativa de los materiales, tales como la extracción de varias familias de testigos para su ensayo en laboratorio para obtener su resistencia actual a compresión, la profundidad de carbonatación o la obtención del perfil en profundidad del contenido de cloruros.

Se ha realizado también una campaña de ensayos pull-out para aseguramiento de un valor mínimo de tensión de adherencia de los hormigones para sus tratamientos superficiales.

Finalmente, se han obtenido también muestras de aceros, activo y pasivo, sobre los que ensayar su resistencia a la tracción, y contrastar de este modo los valores resistentes indicados en el proyecto “as built” de las estructuras.

2.2. Comprobación estructural

Se han definido modelos de cálculo siguiendo la información recogida en los planos “As built” y las propiedades nominales de los materiales.

Con ellos, se llevó a cabo la comprobación de la capacidad estructural de los puentes actuales para hacer frente a las acciones definidas de acuerdo a los Eurocódigos (incluyendo el vehículo especial LM3) y a la nueva normativa eslovaca de acciones sísmicas, debiéndose emplear los preceptos del EN1992 como base de diseño para su comprobación estructural, tratándolas como estructuras de nueva construcción.

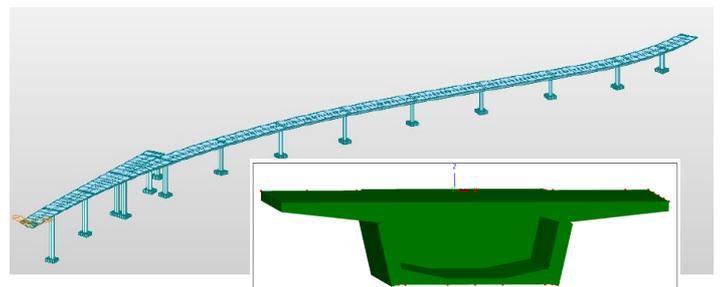
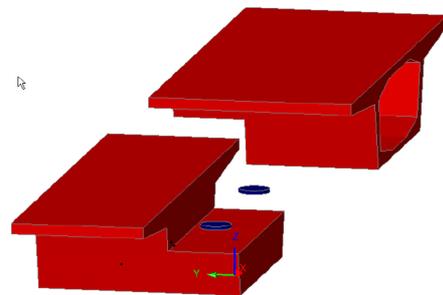


Figura 9 Modelo E.F. para análisis de tablero y subestructura del puente 211



Los tableros originales fueron comprobados frente a ULS de flexión y cortante longitudinal y transversales de la sección, así como a las comprobaciones tensionales en servicio, asumiéndose una clase de exposición XD3 según la terminología de EC por el uso de sales fundentes, por lo que se exige que la sección se mantenga completamente comprimida bajo la combinación frecuente de acciones, siendo en general éste el criterio dimensionante para el caso de los tableros, mientras que la nueva acción sísmica (superior a la vigente en el proyecto original) lo ha sido para el caso de las pilas.

3. Resultados del análisis

3.1. Resultados del cálculo estructural

A pesar de que en general la condición del hormigón es buena, con resistencias superiores a las nominales- este incremento se ha considerado en el cálculo-, el resultado del análisis es la necesidad de algunos refuerzos estructurales debido al cambio de la normativa de acciones y de diseño estructural, para adecuarlas a los Eurocódigos.

A pesar de su apariencia similar en geometría, el armado y pretensado dispuestos en los puentes actuales es muy dispar entre ellos, por lo que las necesidades de refuerzo también lo son. A modo de resumen se indican a continuación:

- ELU flexión longitudinal: En general los puentes tienen actualmente suficiente capacidad estructural frente al agotamiento a rotura por flexión
- ELU cortante longitudinal: En general los tableros tienen suficiente capacidad en los tramos alejados de las pilas, pero no así en las cercanías de ellas, donde un refuerzo a cortante es necesario.
- ELS tensiones en el hormigón: En todos los casos, la combinación frecuente de acciones provoca tracciones en el tablero –tanto en cara inferior en centro de vanos y en cara superior sobre pilas-, no cumpliéndose los requerimientos exigidos por EC2 para el ambiente XD3. Por ello, un refuerzo del pretensado es necesario en todos los puentes.
- ELU flexión transversal: Resulta necesario el refuerzo de la armadura transversal en cara superior de arranque de los voladizos en algunos puentes tan sólo en localizaciones puntuales cerca de las pilas.
- ELU cortante transversal: No es necesario el refuerzo de cortante de la losa superior.
- Pilas: Es necesario el refuerzo de la zona inferior de los fustes de pilas, cerca de la base. En el puente más largo, 211, en la pila extrema resulta necesario sustituir la rótula plástica por un apoyo deslizante. Los encepados de cimentación deben ser reforzados, por el mayor nivel de esfuerzos aplicados en situación sísmica.

3.2. Resultados de la campaña de inspección

De la campaña de inspección de los puentes objeto de la rehabilitación resulta que, en general, están en buena condición con algunos daños localizados que requieren de actuaciones específicas adicionalmente a las necesarias de forma generalizada para garantizar la vida útil a los 100 años.

Los resultados principales se pueden resumir como sigue:

Relativas a la GEOMETRIA:

- Se confirma la concordancia entre dimensiones reales y teóricas indicadas en los planos “As built”
- Algunas zonas presentan insuficiente espesor de recubrimiento de las armaduras, especialmente de forma generalizada la cara inferior de los voladizos.

Relativas a DAÑOS:

- Hay daños localizados debidos al flujo de agua rica en sales fundentes, con signos de corrosión.
- Fisuración de paramentos, con presencia de humedades
- Daños locales: coqueras, eflorescencias, etc.
- Accesorios en mal estado

Relativas a MATERIALES:

- Hormigón de tableros en general con resistencias bastante superiores a la

nominal, muy homogéneo en propiedades en toda la estructural.

- Valores muy altos de la resistencia a tracción de los hormigones obtenidos del pull-out, muy superiores a los mínimos necesarios para los trabajos superficiales en el hormigón.

Relativas a DURABILIDAD:

- Profundidad de carbonatación casi nula en los hormigones, que sin despasivado del recubrimiento.



Figura11 Profundidad de carbonatación en testigos

- En general nivel de cloruros bajo, a excepción de ciertas localizaciones muy expuestas al contacto directo con las aguas de escorrentía ricas en sales fundentes (bordes y cara inferior de voladizos de los tableros).

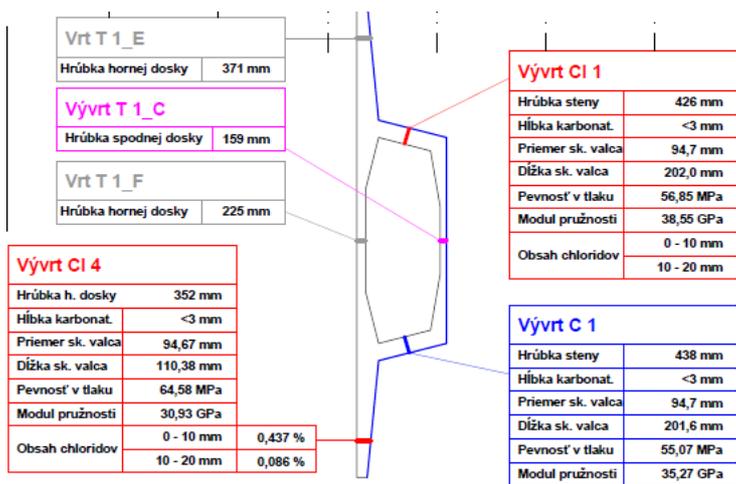


Figura12 Ejemplo de tabla de resultados de contenido en cloruros en las secciones de tablero

- Donde hay alto contenido de cloruros en superficie, los perfiles obtenidos ponen de manifiesto que los hormigones son muy compactos con

baja velocidad de difusión de los cloruros en profundidad.

- Mapas de Potenciales eléctricos indican riesgo medio-bajo excepto en zonas localizadas, que coinciden con observación visual de signos de corrosión.

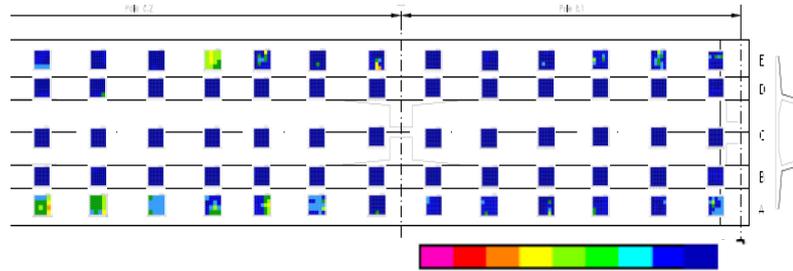


Figura13 Mapa potencial eléctrico en cara inferior de tablero

4. Actuaciones de refuerzo estructural

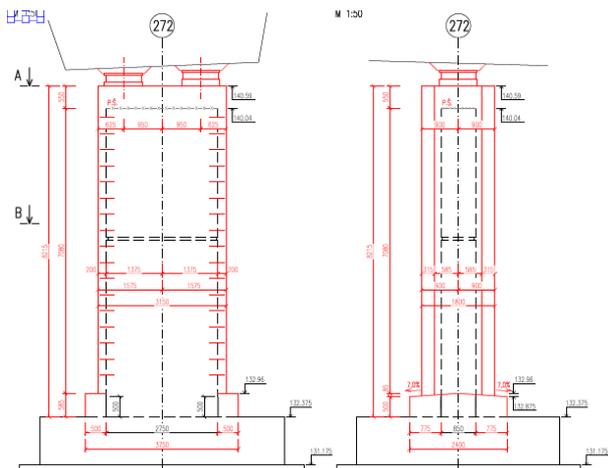
4.1. Tablero

Como se ha expuesto anteriormente, la necesidad de refuerzo estructural frente a los esfuerzos de flexión longitudinal del tablero viene marcada principalmente por la condición de descompresión bajo combinación frecuente que impone el EC2 para ambientes XD.

Por ello, es imprescindible la definición de un refuerzo activo, con pretensado adicional, que mejore la situación tensional en el hormigón de forma permanente.

Por su facilidad de instalación minimizando la afección al tráfico y aprovechando la fácil accesibilidad al interior de los cajones, se ha definido un refuerzo con un nuevo pretensado adicional no adherente por el interior del cajón, formando una poligonal entre sus anclajes extremos (en estribos o tras los macizos de las juntas a media madera), diafragmas de pila y los desviadores intermedios de nueva ejecución. (ver figuras 15y 16)

Estos desviadores se definen de hormigón armado, conectados al cajón mediante barras de pretensado en las zonas de concentración de tracciones por flexiones locales y armadura pasiva para conexión de rasantes.



5. Actuaciones de tratamiento por durabilidad

Se han propuesto 3 tipos actuaciones encaminadas a la mejora de las condiciones de durabilidad de las estructuras, para asegurar una vida útil de 100 años.

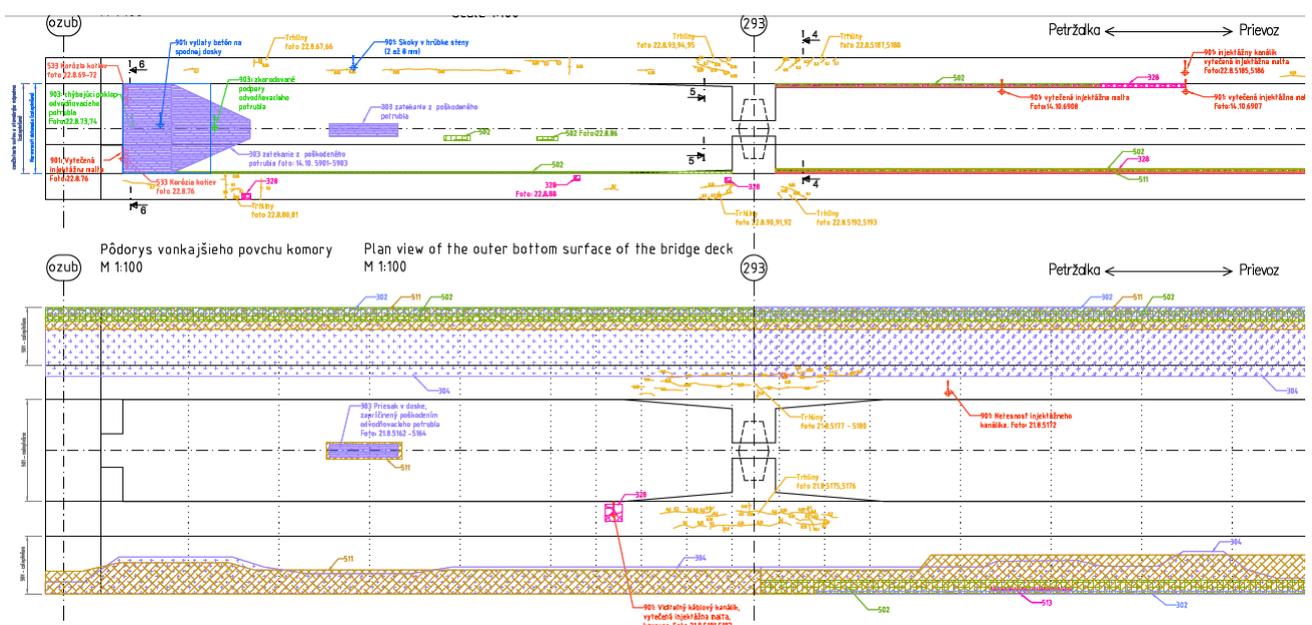
- Tratamientos localizados de rehabilitación y reparación de los daños detectados durante la campaña de inspección, tales como coqueras, corrosión de barras por falta de recubrimiento, desconchones, humedades. Básicamente, el tratamiento consiste en el

picado de saneo, pasivación y reconstrucción con mortero de reparación estructural R4.

- Tratamiento extensivo en las zonas de cara inferior y bordes de los voladizos, donde tras el saneo anterior se aplica un producto cementoso elástico protector que equivale a un recubrimiento de 30mm de hormigón frente a la penetración de cloruros, para compensar la falta de recubrimiento detectada, sin que suponga ningún incremento de peso propio.
- Tratamiento extensivo a todas las superficies del tablero y paramentos de pilas y estribos, con limpieza, sellado de fisuras y aplicación de tratamiento anti-carbonatación.

Adicionalmente, se acometen actuaciones adicionales específicas dignas de ser destacadas como son la adecuación de los paramentos de las juntas a media madera, con una operación complicada de sustitución de apoyos debido a la falta de espacio útil de trabajo. En ellas, en las actuaciones de 1999 las superficies se picaron dejando las barras expuestas al aire, por lo que deben reconstruirse los recubrimientos, protegiendo las barras activas instaladas entonces, así como sus anclajes.

Accesorios tales como impermeabilización de tableros, apoyos, juntas de dilatación, drenajes, barreras, etc. serán completamente reemplazadas.



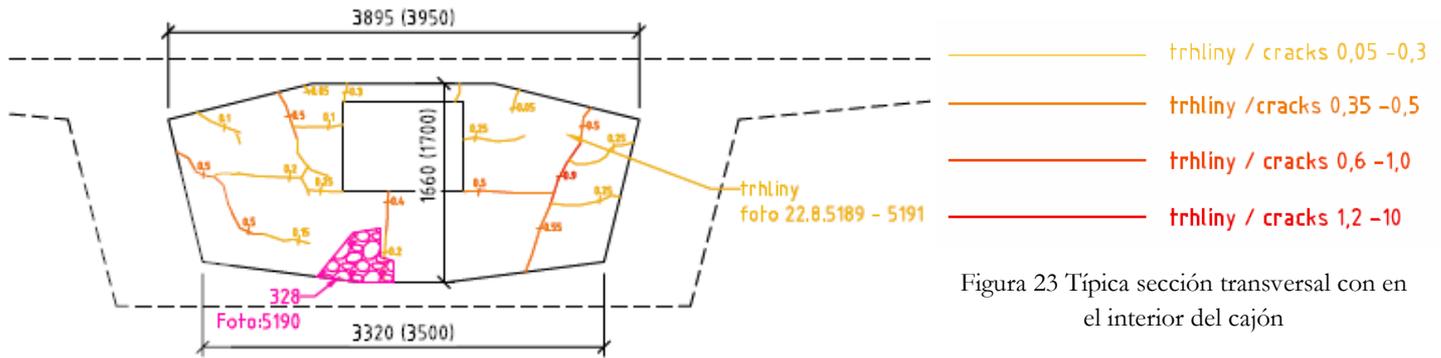


Figura 23 Típica sección transversal con en el interior del cajón

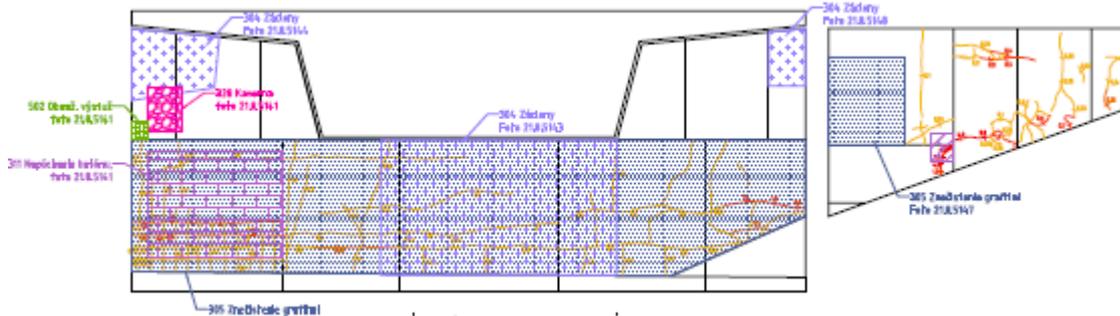


Figura 24 Típicas intervenciones en alzado de estribos

Typ šrafy / Hatch	číslo number	Názov poruchy / Type of failure	Opatrenia / Actions
[Blue dotted pattern]	301	výkvetý / cement flowering	A, B, D, E
[Blue diagonal lines]	302	inkrustácie / incrustation	A, B, D, E
[Blue wavy pattern]	304	záclony / curtains shaped wet spots	A, B, D, E
[Blue grid pattern]	305	znečistenie / pollution	A, E
[Purple brick pattern]	311	lokálne napúchanie / local concrete swelling	A, B, D, E
[Purple diagonal lines]	312	odlamovanie betónu / breaking of concrete	A, B, D, E
[Red brick pattern]	315	rozpad betónu / decomposition of concrete	A, B, D, E
[Pink circular pattern]	328	kaverna / caverns	A, B, D, E
[Green diagonal lines]	501	nedostačné krytie betonárskej výstuže / poor coverage of the reinforcement	A, B, C, D, E
[Green grid pattern]	502	obnažená betonárska výstuž / exposed reinforcement	A, B, C, D, E
[Green brick pattern]	511	korózia betonárskej výstuže / corrosion of reinforcement	A, B, C, D, E

Proposed repair works, treatment of surfaces - SUBSTRUCTURE

Index	Position	Proposed action	Pozícia
A	All surfaces	Cleaning of the whole area with pressure water from graffiti, creating a rough surface	Všetky povrchy
B	Spalled, damaged concrete	Removal of spalled concrete parts and areas where the concrete is damaged (typically at the places of corroding steel bars)	Narušený betón
C	Corrosion of exposed reinforcement	Cleaning and passivation of reinforcement	Korózia odnaženej výstuže
D	Areas with defects	Local repairs with repair mortar	Oblasti s poruchami
E	All surfaces	Elastic painting protecting against carbonation	Všetky povrchy
F	Cracks <0.3 mm		Trhliny <0.3 mm
G	Cracks 0.3-1.0 mm	Fill	Trhliny 0.3-1.0 mm
H	Cracks >1.0 mm	Injection with resin	Trhliny >1.0 mm

Figura 25 Intervención en superficie de alzados de pilas

El momento de redacción de este resumen, en Noviembre de 2019, coincide con el comienzo las obras de rehabilitación y refuerzo de los puentes de Prievoz.