

Principales patologías asociadas a puentes de carretera

Pulido Sánchez, Ignacio¹

Palabras clave: *patologías en puentes de fábrica, puentes de vigas, puentes de hormigón, puentes metálicos y mixtos, socavación, humedades, lavado de llagas, aparatos de apoyo, extremos de vigas, corrosión, ataques químicos, apoyos a media madera, aligeramientos, cuñas de postesado, detalles, fatiga.*

1. Introducción

Las tareas de inspección, conservación, mantenimiento y reparación de estructuras están cobrando cada día más importancia e interés en nuestro país, tanto desde el punto de vista de las diferentes Administraciones Públicas, que cada año destinan mayor presupuesto para las tareas de conservación de estructuras, como desde el punto de vista de las Consultorías, que apuestan por la especialización en este campo.

En la actualidad, la experiencia adquirida por las diferentes Administraciones y empresas consultoras especialistas en la realización de inspecciones de puentes -básicas, principales y especiales- han puesto de manifiesto la presencia de daños sistemáticos en muchas estructuras en función de su tipología, en numerosas ocasiones de difícil y costosa solución.

Muchos de estos daños y patologías no se detectan únicamente en puentes antiguos sino que muchos de ellos se encuentran en puentes modernos, incluso de menos de 5-10 años, estructuras cuya envergadura suele ser un importante condicionante en la solución y reparación de los daños, sin considerar la propia gravedad de los mismos, tanto desde un punto de vista funcional -situados normalmente en vías de alta intensidad de tráfico- como estructural -debido a las mayores dimensiones y tecnologías utilizadas en la actualidad.

A lo largo del presente artículo se exponen los daños más frecuentes detectados en las numerosas inspecciones de puentes realizadas por el autor a lo largo de los últimos años, con objeto de intentar concienciar a todas las partes implicadas en el diseño y construcción de los puentes: Administraciones, Proyectistas y Constructores, en la importancia del cuidado de los detalles constructivos, tanto en su definición como en su

¹ Ingeniero de Caminos; IDEAM.

ejecución y conservación, lo que mejorará la vida útil de los puentes y retrasará y facilitará las tareas de reparación.

En el apartado siguiente se incluyen los daños más frecuentes detectados en puentes de carretera en función de las tipologías más frecuentes utilizadas en la actualidad. Si bien se pueden realizar numerosos matices al orden y clasificación adoptado, se considera que éste recoge de una forma más o menos ordenada los daños más habituales que se suelen encontrar en los puentes carreteros.

En primer lugar se habla de los puentes de fábrica, entendiendo como éstos a aquellos constituidos por sillares o mampostería y hormigón en masa. A continuación se comentan los daños más frecuentes detectados en los puentes de vigas y puentes de hormigón, tanto armado como pretensado. Finalmente, se habla de los daños asociados a los puentes metálicos y mixtos.

El tercer y último apartado del artículo habla de una serie de daños sistemáticos que se suelen producir en los puentes, independientemente de su tipología, ligados más a las propias condiciones de contorno y a los equipamientos utilizados en la construcción de los puentes.

2. Descripción de patologías por tipología estructural

Siempre que se plantea hablar sobre las principales patologías asociadas a los puentes o cualquier otro tipo de estructura, suele plantearse la disyuntiva de realizar la descripción por elemento o por tipología estructural, es decir, por cada elemento constituyente de los puentes, en este caso concreto, o en función de su configuración tipológica y funcionamiento resistente.

Desde un punto de vista práctico y con objeto de orientar a los responsables y personal técnico encargado del mantenimiento de las infraestructuras, se ha decidido estructurar este artículo en función de las tipologías de puentes más utilizadas en las diferentes redes de carreteras del país. A este respecto, el objetivo del presente artículo no pretende realizar un listado exhaustivo de todos los diferentes daños que puedan llegar a presentar las estructuras, sino resaltar aquellos daños, que en función de las tipologías estructurales más utilizadas, resulten más frecuentes y habituales.

2.1. Puentes de fábrica

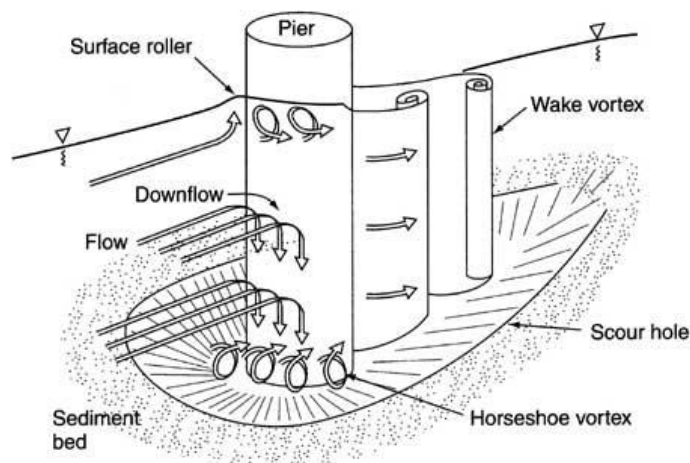
Los puentes de fábrica suelen ser estructuras que presentan pocos daños estructurales en términos generales, si bien cuando lo presentan, a menudo, suelen ser importantes. Por el contrario, suelen presentar daños por durabilidad o estéticos, frecuentemente, los cuales con el paso del tiempo, si no se aplican las correspondientes medidas correctoras, pueden acabar degenerando en problemas de conservación serios.

2.1.1. Problemas de estabilidad por socavación

La principal problemática que presentan las obras de fábrica son los daños asociados al fallo de la cimentación o elementos principales de sustentación. Los puentes de fábrica son estructuras cuyo esquema estructural es por forma -arcos- y no por resistencia. Este tipo de estructuras resulta especialmente sensible a la pérdida o movimiento de un apoyo, produciendo en la estructura una serie de esfuerzos los cuales no siempre son asumibles por ésta, produciendo giros, asentos, etc, pudiendo llegar, incluso, a producir el colapso de la estructura.

Como bien es sabido, la socavación es el resultado de la acción erosiva del flujo de agua sobre los ríos, que arranca y acarrea el material del fondo del lecho y de las bancadas laterales. A este respecto, se debe diferenciar entre la erosión general y la local. La primera es debida al arrastre de las partículas sólidas del lecho del cauce producida por

el paso del agua a una velocidad superior que la velocidad crítica, lo que conlleva el arrastre de estas partículas. La erosión local se produce en presencia de obstáculos en los cauces, como son los estribos y pilas junto con sus respectivas cimentaciones. El agua, al chocar frontalmente y a gran velocidad contra estos obstáculos, produce un flujo de partículas descendentes que, al chocar con el fondo del cauce, producen una serie de vórtices que arrastran violentamente el material del fondo del lecho, produciendo fosas de socavación, de grandes dimensiones generalmente, que pueden llegar a afectar a la cimentación del elemento, poniendo en riesgo su estabilidad, y con ello, el de la estructura. Los mayores daños por socavación se producen durante las avenidas, períodos en los que la velocidad de la corriente del agua es máxima, produciendo los mayores daños sobre las cimentaciones de pilas y estribos.



*Figura 1: Esquema del flujo de agua en presencia de un obstáculo (pila).
Desarrollo de vórtices de erosión. [1].*

Dentro de las labores de inspección de puentes, se debe realizar especial hincapié en esta patología pues su desarrollo final suele ser brusco y repentino, pudiendo tener consecuencias devastadoras e irreversibles, poniendo en riesgo la estabilidad general de la estructura.

Desde el punto de vista de la inspección y conservación de los puentes, conviene resaltar, a menudo, la dificultad de realizar inspecciones y análisis detallados de las cimentaciones de las estructuras debido a las dificultades de acceso, limitaciones técnicas, medios y equipos de acceso, limitaciones económicas, etc. Por este motivo, resulta imprescindible, disponer de una buena documentación del Proyecto de Construcción y Liquidación de las Obras, donde queden reflejadas todas las características de la cimentación realmente ejecutada -geometría y características- y del terreno de apoyo, aportando una información vital para la posterior conservación y

evaluación posterior de los puentes, prácticamente imposible de realizar sin la existencia de estos datos previos.



Figura 2. Fosa de socavación en un puente arco de fábrica.



Figura 3. Cimentación de pila afectada por la erosión general y local, en un puente arco de hormigón.

Los daños por socavación o erosión pueden tener diferentes niveles de desarrollo en función de la zona donde se produzca el daño, así como en función de la intensidad de exposición. En función de la configuración de la estructura, sillares habitualmente, existe una cierta capacidad de reparto y deformación de las obras de fábrica antes de que se produzca su colapso total, manifestando una cierta capacidad de acoplamiento a las deformaciones impuestas y, por tanto, de redistribución de esfuerzos.

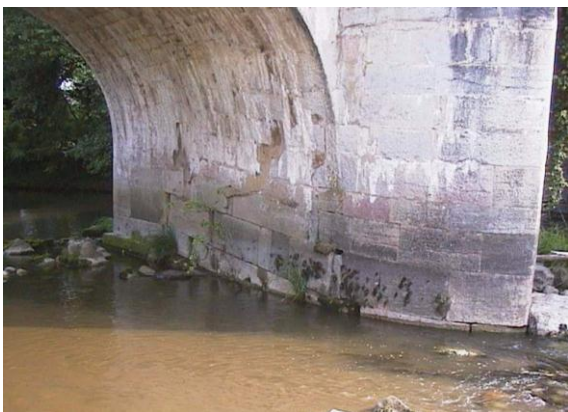


Figura 4: Giro transversal de pila por efecto de la socavación aguas arriba de la misma.

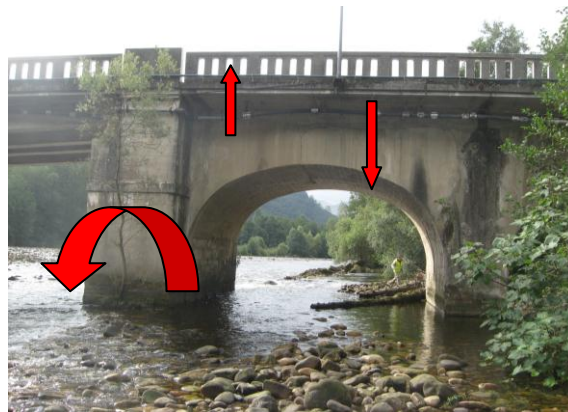
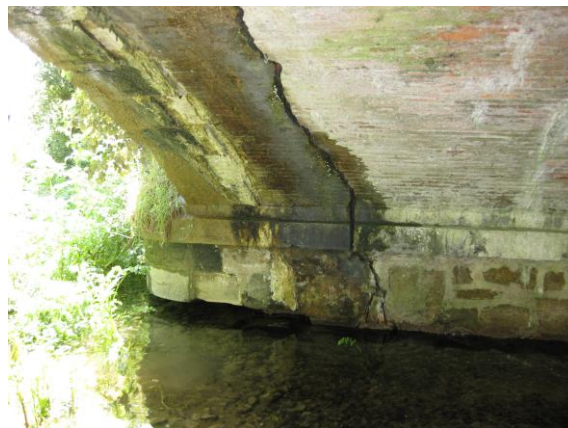


Figura 5: Giro longitudinal de pila por erosión lateral de cimentación, con el consiguiente movimiento y agrietamiento de la bóveda.

Hay otras veces que la acción violenta del agua sobre las obras de fábrica, pueden producir el lavado de llagas de los elementos estructurales de los puentes, produciendo la pérdida del material de rejuntado y, con ello, la pérdida de los mampuestos. Este tipo de daño suele estar asociado a los puentes de mampostería, más que a los de sillería, pues la función del rejuntado en los primeros resulta primordial, mientras que en los segundos supone una mejora resistente.



Figuras 6 y 7. Lavado de llagas en muro de frente de mampostería, llegando a arrancar parte de los mampuestos, produciendo el descalce parcial del muro, produciéndose el correspondiente giro y apertura de grieta en la bóveda.

Cuando las estructuras de fábrica presentan un constitución mixta, de fábrica y hormigón en masa, y éste se ha utilizado en las cimentaciones o alzados de estribos o pilas, los daños por socavación, al contrario que en los elementos de fábrica, suele producirse de forma violenta, sin previo aviso. La capacidad de resistir tracciones del hormigón, unido a la gran rigidez que suelen presentar estos elementos en su plano, pueden ocultar, a simple vista, posibles daños por socavación, produciéndose el colapso de estas estructuras, habitualmente, de forma violenta.



Figuras 8 y 9. Colapso de estructura por socavación en cimentación rígida. La rigidez de la cimentación y el monolitismo del muro de frente han ido “ocultando” los daños de erosión y socavación del puente hasta que se ha producido su colapso total.

2.1.2. Problemas por circulación de agua

El otro daño habitual que este tipo de estructuras suele manifestar, es el agua que se filtra por la plataforma, a través del relleno y de los propios muros frontales. En función del material de relleno de la estructura, así como del propio material constituyente del

puente y del material de rejuntado, se pueden llegar a producir una serie de daños u otros. Los daños más habituales que se suelen producir son las humedades y eflorescencias debidas a la circulación del agua y a la disolución de las sales tanto del propio relleno, como de la fábrica o del material de asiento y rejuntado de la fábrica.



Figuras 10 y 11. Humedades por circulación de agua desde el trasdós de la bóveda a través de las juntas, produciendo el lavado de llagas y la precipitación de sales.

Otro tipo de daño que suele manifestarse en esta tipología de puentes por circulación de agua es el completo lavado de llagas y/o la disolución de los sillares, llegando a producirse el descuelgue de los mismos. Este tipo de daños suele ir asociado al paso del tráfico, que produce vibraciones así como la compresión y descompresión de los sillares, permitiendo la caída o descuelgue de los mismos.



Figura 12. Lavado de llagas por circulación de agua.



Figura 13. Sillar descolgado por lavado de llagas.

2.2. Puentes de vigas

Se entiende por puentes de vigas a aquellas estructuras formadas por elementos prefabricados longitudinales, con sección en doble “T” o vigas artesas. Esta tipología de puentes presenta una serie de particularidades que hacen que manifiesten una serie de daños específicos con cierta frecuencia.

2.2.1. Aparatos de apoyo

Debido a la propia configuración estructural de los puentes de vigas, estas estructuras tienen numerosos aparatos de apoyo, dos por cada viga, siendo éstos un punto delicado en cuanto a la conservación y el mantenimiento de estas estructuras se refiere.

Al igual que el resto de las estructuras, los puentes de vigas deben ajustarse a los trazados de las carreteras y Autovías. Trazados, cada vía más estrictos y condicionantes de la geometría de las estructuras, presentando en muchas ocasiones importantes pendientes longitudinales y transversales, lo que obliga a la disposición de cuñas y camas de nivelación para poder disponer los aparatos de apoyo horizontales y con las caras de apoyo paralelas.

A este tipo de problemas geométricos, han de sumarse los inherentes a la construcción de las vigas y al propio proceso de montaje de la estructura. La curvatura inicial que presentan las vigas desde que se fabrican hasta que entran en carga las cargas permanentes de la estructura, así como la debida a los efectos de retracción y fluencia, implican que estos elementos presenten una curvatura no despreciable cuando se ponen en obra, así como durante la propia vida útil del puente.

Adicionalmente a los problemas anteriormente descritos, se han de sumar los debidos a la habitual falta de definición de estos detalles durante la fase de proyecto, así como a la frecuente deficiente puesta en obra de este tipo de elementos estructurales.

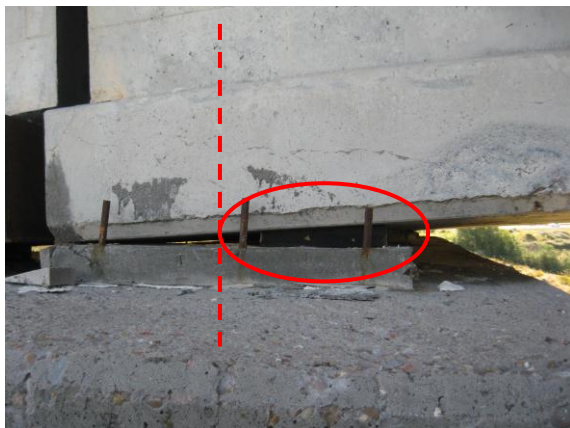


Figura 14. Desplazamiento de aparato de apoyo de neopreno zunchado por falta de cuña de nivelación. Apoyo de culata de viga sobre cama de nivelación.



Figura 15. Aparato de apoyo de neopreno zunchado a punto de caerse del dintel de pila, expulsado por la ausencia de cuña de nivelación.

Tradicionalmente se han dispuesto aparatos de apoyo con cuñas metálicas vulcanizadas a los aparatos de apoyo para absorber las posibles faltas de paralelismo entre la meseta de nivelación -cara inferior de apoyo- y la viga. Este tipo de solución, cuando las pendientes son significativas, se ha podido comprobar en numerosas estructuras que acaban presentando problemas de estabilidad y reptación de los apoyos, con las importantes consecuencias que ello supone.



Figura 16. Apoyo de neopreno zunchado con cuña vulcanizada, colocado al revés. Rotura de apoyo por zona de cuña.



Figura 17. Rotura de aparato de apoyo de neopreno zunchado por deficiente dimensionamiento para los movimientos impuestos.



Figura 18. Rotura de aparato de apoyo de neopreno zunchado con cuña metálica por esfuerzos tangenciales.

2.2.2. Daños por circulación de agua

Esta tipología de puentes suele presentar numerosas juntas de dilatación bien por su elevada longitud o por la falta de detalles específicos de continuidad de losa, así como las propias juntas de los estribos.

Debido a la frecuente falta de estanqueidad de las juntas de dilatación, incluso a la falta de las propias juntas en numerosas ocasiones, se produce la circulación de agua a través de las juntas de estructura, lo que conlleva a la aparición de numerosos daños en las

vigas, así como a la contaminación de los hormigones por cloruros y otros tipos de sales en las zonas donde existen problemas de vialidad invernal.

Estos daños, que serían propios de cualquier tipología estructural, en los puentes de vigas doble “T” que disponen vigas de borde presentan una especial importancia, produciéndose daños y deterioros en estos elementos debido a la circulación de agua y sales de deshielo.

También se han de tener en cuenta los detalles inadecuados de los sumideros o imbornales en este tipo de puentes donde frecuentemente el agua escurre directamente por los paramentos de las vigas, especialmente por las vigas de borde, coincidentes con la posición de los desagües.



Figura 19. Daños en viga de borde por falta de bajante en desagüe, escurriendo el agua por el alma de la viga, produciendo daños por corrosión.



Figura 20. Cabeza de pila de puente de vigas con daños significativos por circulación de agua a través de la junta de dilatación.

2.2.3. Extremos de vigas

Los extremos de las vigas suelen ser otro elemento frecuente donde se localizan daños sistemáticos en este tipo de estructuras, especialmente en el caso de las vigas doble “T”. Las vigas pretensadas se fabrican en el suelo, sobre una bancada, en la que se tesan los torones y se realiza el ferrallado y hormigonado de la viga. Cuando el hormigón alcanza una cierta resistencia, se procede a la transferencia del pretensado mediante el destesado de los cables en la bancada y el corte de los mismos. Como operación final se procede al refrentado de las vigas, es decir, a la aplicación de un mortero para la protección de los torones.

En numerosas ocasiones y, especialmente, en las zonas de juntas de dilatación, se producen importantes daños por la circulación de agua a través de las mismas, produciéndose la degradación del mortero del refrentado, con la consiguiente oxidación

de los torones del pretensado, así como la aparición de daños ligados a la oxidación y degradación del hormigón, apareciendo lajaciones, desconchones y la oxidación de las armaduras activas y pasivas.



Figura 21. Detalle de junta entre vigas con importantes daños por la circulación de agua a través de la junta de dilatación.



Figura 22. Degradación del refrentado de vigas y fisuración y lajación del hormigón, con corrosión de las armaduras.

2.3. Puentes de hormigón

Dentro de la categoría de puentes de hormigón, se han agrupado todas aquellas estructuras construidas en hormigón armado o pretensado/postesado. En primer lugar se incluyen los daños que se consideran comunes a todos los puentes de hormigón, independientemente de su configuración estructural. En segundo lugar se incluyen una serie de daños típicos asociados a los puentes postesados o con continuidad estructural.

2.3.1. Problemas por corrosión

Si bien ya se ha comentado con anterioridad para la tipología de puentes de vigas, el hormigón presenta una serie de daños específicos por corrosión de las armaduras. Si bien existen diferentes procesos de corrosión de las armaduras, la más frecuente es la corrosión por la carbonatación del hormigón, si bien también se puede producir la corrosión de las armaduras por ataque por cloruros, así como la corrosión bajo tensión, si bien ésta última resulta poco frecuente.

El fenómeno de la carbonatación tiene lugar al reaccionar el CO₂ de la atmosfera con el hidróxido cálcico del hormigón, lo que produce carbonato cálcico:



Dicho fenómeno tiene lugar en todos los hormigones y se va produciendo a partir de la superficie y penetrando hacia el interior. La velocidad de penetración depende de la permeabilidad del propio hormigón, del ambiente que le rodea, especialmente las condiciones de humedad, así como la propia circulación del aire con aporte de oxígeno. La carbonatación implica el descenso del pH del hormigón al ir desapareciendo el hidróxido cálcico, principal responsable de que la pasta cementante sea un medio fuertemente básico o alcalino (pH del orden de 12-13).

La oxidación de la armadura produce un importante aumento de volumen, lo que produce una serie de tensiones internas en el hormigón, las cuales éste no es capaz de resistir, acabando por producir la lajación y posterior desconchón del hormigón, dejando las armaduras totalmente al aire y expuestas frente a los agentes atmosféricos.



Figuras 23 y 24. Detalles de corrosión generalizada por carbonatación del hormigón.

Estos hechos se suelen ver agravados en las zonas donde existe una humedad ambiente elevada, pero no saturada y con gran aportación de oxígeno.

En función de la tipología concreta de la estructura, hay puentes más propensos a sufrir problemas por carbonatación que otros. Por ejemplo, las losas macizas o aligeradas, son estructuras que tienen un perímetro expuesto a los agentes atmosféricos bastante pequeño en comparación con otras tipologías por lo que, en principio, deberían presentar un mejor comportamiento frente a la corrosión por carbonatación. En cambio, por ejemplo, los puentes arco típicos de la colección de D. Eugenio de Ribera -arcos cuya armadura es una celosía metálica formada por perfiles laminados en “L” que servía de autocimbra durante la construcción y como armadura durante la explotación- suelen presentar frecuentes e importantes daños por corrosión de armaduras, especialmente en la armadura de negativos de las secciones de arranque.



Figura 25. Detalle de corrosión por carbonatación en ángulo de viga doble "T".



Figura 26. Oxidación de perfiles metálicos propio de puentes de la colección de E. Ribera.

Así mismo, el alcance e importancia de los daños por corrosión suelen ir ligado a la zona afectada por los daños, no resultando igual, evidentemente, que se vea afectada la armadura de la cara de intradós de un muro que la armadura de flexión de una viga en el centro de vano, la armadura de cortante en las inmediaciones de un apoyo o, como se ha comentado en el párrafo anterior, la armadura de flexión negativa en un arco empotrado.

2.3.2. Ataques químicos

Los ataques químicos del hormigón, si bien no suelen resultar daños frecuentes, no deben pasar desapercibidos, pues habitualmente suelen ir asociados a importantes problemas de durabilidad en las estructuras, pudiendo llegar a producir niveles de deterioro que aconsejen la demolición de las mismas.

Entre los ataques químicos más frecuentes, encontramos:

- Ataque por sulfatos, cloruros, carbonatos y otros iones.
- Ataque por ácidos.
- Reacción árido-álcalis.

La detección a tiempo de este tipo de reacciones expansivas en el hormigón y la aplicación de medidas correctoras adecuadas, suele ser primordial para la posible protección y conservación de los puentes. Este tipo de patologías suele ir asociado, una vez más, a la presencia de humedad y agua, debiendo en estos casos, por tanto, evitar al máximo la entrada de agua a la estructura, permitiendo, a su vez, la transpiración del hormigón, posibilitando la pérdida gradual de humedad del hormigón.



Figuras 27 y 28. Vista general y detalle de estribo afectado por un ataque por sulfatos.

2.3.3. Apoyos a media madera

Si bien este tipo de daño se podría ubicar dentro del último apartado, se ha considerado apropiado incluir este tipo de detalle específico dentro de los puentes de hormigón, pues es en esta tipología donde mayormente se utilizan, aunque no hay que olvidar que también existen apoyos a media madera metálicos.

La principal ventaja estructural que supone la utilización de este tipo de apoyo es la posibilidad de introducir una rótula en la estructura, permitiendo establecer la continuidad sobre las secciones de pila al disponer estas articulaciones en las secciones de quintos/cuartos de luz, compensando de esta forma parte de los esfuerzos de flexión negativa y reduciendo los esfuerzos de flexión positiva, pudiendo acudir a luces más grandes que con vigas biapoyadas.

Este tipo de apoyo cobró especial importancia en los años 1950 cuando se construía únicamente en hormigón armado. Posteriormente, con el desarrollo de los elementos prefabricados, en los años 1980, se volvió a utilizar frecuentemente este tipo de detalle, para poder compatibilizar las máximas longitudes de viga prefabricables y transportables con las luces impuestas por el trazado y las afecciones orográficas.



Figura 29. Puente de hormigón armado con apoyos a media madera.



Figura 30. Puente de elementos prefabricados con apoyos a media madera.

Habitualmente se han realizado apoyos a media madera, en cuanto a su geometría se refiere, demasiado estrictos, lo que unido a su deficiente ejecución -recubrimientos excesivos, deficiencias de armado, etc- y a una mala conservación de la impermeabilización de la junta de dilatación, han sido factores decisivos que han acabado produciendo daños importantes en esta tipología de apoyos. Las pequeñas dimensiones de las juntas y de las camas de apoyo, de apenas 2-3 cm en muchos casos, unido a la acumulación de suciedad en las juntas y a las bajas/medias calidades de los hormigones de la época, terminan por producir la degradación del hormigón, llegando a producir su agrietamiento y rotura, debiendo proceder a su demolición y reconstrucción.

Igualmente, resaltar las dificultades técnicas y operativas que surgen para realizar la reparación/sustitución de este tipo de aparatos de apoyo, fundamentalmente por su ubicación longitudinal en la estructura, separada de las pilas entorno a $0,20 \cdot L$, como ya se ha comentado.



Figura 31. Degradación y rotura del apoyo a media madera por la presencia frecuente de agua, acentuado por la estricta entrega de apenas 30 cm.



Figura 32. Degradación del apoyo a media madera por circulación de agua a través de la junta de dilatación, produciendo la oxidación de las armaduras.

2.3.4. Problemas en aligeramientos

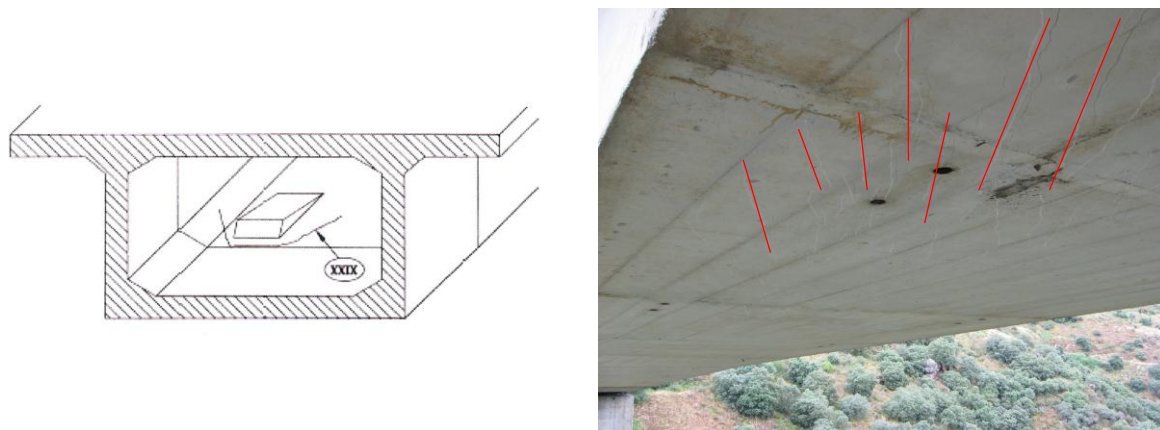
Los aligeramientos de los puentes losa, tradicionalmente han sido de cartón armado - huecos- o de porexpan -sólidos. El principal problema que pueden presentar estos elementos es el flotamiento durante su puesta en obra con la consiguiente pérdida de recubrimientos y fragilidad de la zona superior de la losa, pudiéndose llegar a producir, incluso, la rotura puntual de la losa de hormigón con el paso del tráfico. Así mismo, en el caso de utilización de aligeramientos huecos, éstos pueden acabar llenándose de agua debido a filtraciones y/o roturas puntuales de la losa en plataforma.



Figuras 33 y 34. Rotura de losa de puente con aligeramientos huecos, con la consiguiente entrada de agua al interior de la losa. A la derecha, taladro realizado para evacuación del agua en uno de los aligeramientos.

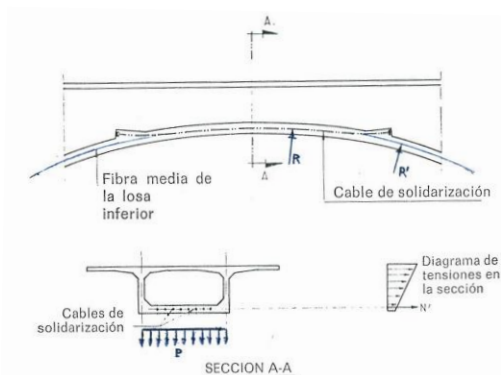
2.3.5. Problemas en cuñas de postesado y fuerzas de desvío

En los puentes fabricados por fases, resulta habitual la utilización de un postesado de continuidad al final de la construcción donde, una vez construida la estructura de hormigón se procede al tesado de continuidad, introduciendo unas fuerzas de pretensado elevadas, del entorno de las 250-300 t por cada cuña, que pueden producir una serie de fisuras por arrastre y difusión que, en caso de no armarse adecuadamente, producen la fisuración de las inmediaciones de las cuñas.



Figuras 35 y 36. Esquema [2] y fotografía con fisuración en puentes con pretensado de continuidad por redistribución de esfuerzos, produciendo fisuras similares a las de arrastre.

En los puentes de canto variable, el pretensado de continuidad (zona de positivos de centro de vano) produce una serie de fuerzas de desvío que producen un doble efecto. Por un lado, en alzado, la curvatura convexa conlleva la aparición de unas fuerzas de desvío que pueden llegar a producir daños en la zona de cuñas y en la tabla inferior por empuje al vacío. Por otro lado, estas mismas fuerzas de desvío, a nivel de sección transversal, son equivalentes a una carga uniforme aplicadas sobre la tabla inferior, produciendo unas flexiones, no despreciables, en este elemento, comprometiendo frecuentemente el estado límite de servicio, produciendo la fisuración de la zona central de la tabla inferior en la zona del centro de vano, donde se produce la máxima fuerza de desvío debido a la acción conjunta de numerosos cables.



Figuras 37 y 38. Esquema [3] de fuerzas de desvío en puentes con canto variable y postesado de continuidad, produciéndose un esquema estático equivalente, a nivel de sección transversal, a una carga uniformemente aplicada sobre la tabla inferior, produciendo frecuentemente problemas de comportamiento en servicio. A la derecha ejemplo de puente con fisuración en centro de vano por fuerzas de desvío.

2.4. Puentes metálicos y mixtos

Los puentes metálicos y mixtos presentan una serie de particularidades especiales que hacen que manifiesten un comportamiento diferente frente a los puentes de hormigón. En este apartado se han englobado los elementos puramente metálicos junto con los puentes mixtos por presentar, generalmente, una serie de daños similares, si bien, en el caso de los puentes metálicos puros, con losa ortótropa, los problemas derivados de los detalles de fatiga son bastante más delicados, debido al mayor número de uniones y elementos esbeltos sometidos a carreras de tensiones importantes, mientras que en los puentes mixtos, la losa es un elemento de hormigón armado, no presentando el resto de elementos del puente, generalmente, problemas de fatiga.

2.4.1. Diseño de detalles y fatiga

Los detalles de los puentes metálicos deben diseñarse adecuadamente en la fase de Proyecto y exigir la realización de unos planos de taller completos con todo tipo de detalles como puedan ser las preparaciones de bordes, la posición de los ojales, la definición de las transiciones de espesores y geometría de chapas, el cruce de soldaduras, los empates de chapas, etc.



Figura 39. Cruce de 3 cordones de soldadura sin ojales, lo que puede acabar produciendo problemas de fatiga en la unión.



Figura 40. Detalle de cruce de soldaduras bien ejecutado con ojales en las chapas secundarias para el paso de los cordones de soldadura.

De cara al comportamiento de la estructura en el tiempo, resulta crucial adoptar buenos detalles constructivos y de ejecución, garantizando de esta forma el comportamiento resistente de la estructura y la ausencia de aparición de problemas de fatiga. Este hecho, como ya se ha comentado anteriormente, resulta de especial en el caso de estructuras metálicas puras donde la losa suele estar diseñada con elementos muy esbeltos, sometidos a importantes carreteras de tensiones.

Con carácter general se deberán comprobar y verificar en campo durante las inspecciones de los puentes metálicos, aquellos detalles constructivos con una clase de detalle inferior a 70-80, por ser más sensibles los problemas de fatiga, si bien este índice no se trata más que de una posible regla general y, en cada caso concreto, se deberá evaluar la posibilidad de acumulación de daño en otros tipo de detalle.

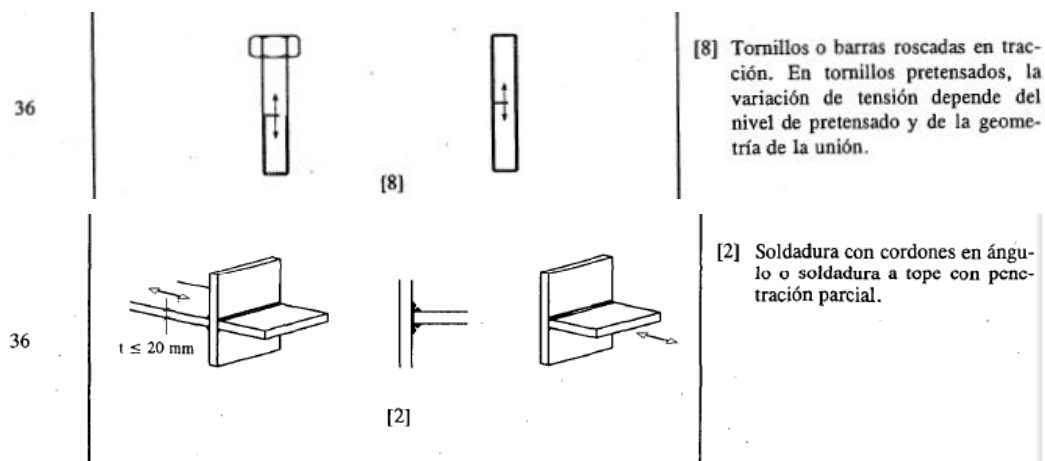


Figura 41. Ejemplo [4] de detalles poco eficiente frente a fatiga.

Así mismo, se deben estudiar y definir detalles adecuados que favorezcan la conservación de los puentes, evitando esquinas y zonas que favorezcan la acumulación de agua y suciedad, zonas cerradas no estancas, uniones de chapas sin ojales, etc. En las imágenes siguientes se incluyen una serie de fotografías con detalles poco adecuados de cara a la conservación y mantenimiento de este tipo de puentes.



Figura 42. Alma lateral puente mixto con sección cajón. Los rigidizadores longitudinales de alma provocan la acumulación de suciedad, agua y humedad, provocando el progresivo deterioro de sus inmediaciones.



Figura 43. Detalle de interior de puente mixto con acumulación de suciedad y humedad, con la consiguiente degradación de la pintura de protección.

2.4.2. Pandeo y abolladura de elementos comprimidos

Los elementos metálicos en general, debido a sus grandes esbelteces suelen ser susceptibles de presentar problemas de inestabilidad, tanto por pandeo en los elementos comprimidos según la directriz de la pieza, como de abolladura en los elementos sometidos a compresiones en su plano.

En el caso del pandeo, los elementos habituales susceptibles de presentar este tipo de problemas son principalmente los fondos y chapas comprimidos, los rigidizadores de apoyo (flexocompresión) y los perfiles de las celosías transversales, así como cualquier otro elemento comprimido (puntales, pilares, cordones comprimidos de vigas en celosía, etc).

La abolladura consiste en la inestabilidad de un panel cuando se somete a tensiones de compresión en su plano. Este hecho, de manifestarse, suele aparecer en almas, en general, y en chapas de fondo de cajones, principalmente en la zona de estribos, donde no existe una rigidización fuerte, ni hormigón de fondo. Los puentes con sección cajón presentan un mecanismo a torsión muy eficaz, resistiendo estos esfuerzos por tensiones tangenciales distribuidas en su sección transversal. La utilización de chapas metálicas muy esbeltas en fondos de cajón, especialmente en la zona de estribos, puede llegar a producir la abolladura del mismo, ante la falta de rigidez en su plano, así como debido a las posibles deformaciones iniciales producidas por acciones indirectas durante la construcción del puente (acopio de material, apuntalamiento y/o apeo del encofrado de losa, acciones accidentales, acumulación de agua por lluvia, etc).



Figuras 44 y 45. Ejemplos de abolladura de panel metálico por compresiones excesivas.

Por otro lado, los puentes continuos de grandes luces, bien sean metálicos o mixtos, independientemente de su tipología, presentan movimientos importantes debido a los efectos térmicos y a la retracción diferencial de la losa. Este hecho provoca

excentricidades significativas en los rigidizadores de los apoyos, pudiendo producir sobresolicitaciones en los mamparos de pilas y estribos, debiéndose verificar el estado de conservación de éstos, comprobando la ausencia de daños estructurales en sus inmediaciones, paneles abollados, fisuras y/o alabeos en rigidizadores,...

2.4.3. Corrosión

La corrosión es el principal problema de durabilidad de los elementos metálicos, resultando altamente sensibles a los factores climáticos y ambientales. Por tanto, estas estructuras requieren un sistema de protección contra la corrosión que asegure el buen estado de conservación de la misma, implicando la necesidad de un mantenimiento periódico.

Un sistema de protección inadecuado o un mantenimiento deficiente dejan a la estructura totalmente expuesta a los ataques del entorno, que comienza a deteriorar el metal mediante alteraciones químicas, a una velocidad que depende en gran medida de la temperatura, la humedad y la agresividad del aire en contacto con los elementos, produciéndose la corrosión del metal.

El producto primario de la oxidación del hierro es el hidróxido ferroso blanco, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que a su vez se oxida a hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de color rojizo. Así, el hierro de la estructura se va transformando, progresivamente, en óxido poroso de hierro hidratado, que se conoce por “herrumbre”, la cual se distribuye en una serie de capas muy blandas y superpuestas.



Figura 46. Comienzo de degradación de pintura de protección en elemento metálico. Obsérvese que comienza y se acentúa en la zona de las soldaduras.



Figura 47. Oxidación de platabanda metálica por circulación de agua y acumulación de suciedad.

Al ser la corrosión del acero un fenómeno superficial, se tiene la certeza de que el resto del material se encuentra en perfectas condiciones, si bien cuando estos defectos se

producen en determinados detalles constructivos, pueden suponer la aparición de entallas, mordeduras y fisuras, con los consiguientes problemas de fatiga que se pueden desencadenar.

En la actualidad, los sistemas de protección más habituales son la pintura y la utilización de aceros autopatinables. Los aceros que necesitan protección contra la corrosión, en función del tipo de ambiente y exposición, se deberá utilizar un sistema de pintura u otro, considerando que se debe aplicar siempre la máxima protección posible en la fase de construcción, para retrasar al máximo las labores de protección y mantenimiento del puente, trabajos habitualmente complejos técnicamente y de coste económico elevado debido a los complicados medios auxiliares que se han de utilizar.



Figuras 48 y 49. Ejemplos de puentes en donde las labores de conservación y mantenimiento de la pintura de protección resultan muy complicadas y caras debido a los medios auxiliares necesarios utilizar. Arriba puente del Firth of Forth y, abajo, puente del Tablate.

Otro punto significativo de los puentes metálicos frente a su susceptibilidad frente a la corrosión es la gran abundancia de ángulos y esquinas, lo que los hace más susceptibles de sufrir los deterioros típicos del acero, como la concentración de tensiones, la acumulación de agua y suciedad, etc. Además, en numerosas ocasiones existen en estos puentes zonas no accesibles en las que se deben adoptar medidas extraordinarias de protección contra la corrosión, como la disposición de chapas metálicas de cierre, utilización de mastics bituminosos o sistemas equivalentes de protección y estanqueidad, etc.



Figura 50. Detalle de protección de perfiles laminados cerrados mediante la colocación de una chapa metálica de cierre.



Figura 51. Utilización de mástic para el sellado de ojales en elementos inaccesibles metálicos, creando recintos estancos y protegidos, por tanto, contra la corrosión atmosférica.

El sistema de protección de los aceros autopatinables consiste en la creación de una película de óxido impermeable al agua y al vapor de agua que impide que la oxidación del acero prosiga hacia el interior de la pieza. Esto se traduce en una acción protectora del óxido superficial frente a la corrosión atmosférica del acero “interior”, con lo que no es necesario aplicar ningún otro tipo de protección al acero. Estos aceros tienen un alto contenido de cobre, cromo y níquel que hace que adquiera un color rojizo anaranjado característico. Este color varía de tonalidad según la oxidación del metal sea fuerte o débil, oscureciéndose hacia un marrón oscuro en el caso de que la pieza se encuentre a la intemperie.

Las estructuras realizadas con este tipo de acero, suelen presentar dos problemáticas. Por un lado, para que se cree la película de pátina deben darse unas condiciones adecuadas de humedad y oxidación que, en el interior de los cajones metálicos no se suele producir, debiendo protegerse mediante la aplicación de una adecuada pintura de protección. Por otro lado, habitualmente, los elementos de rigidización se realizan con aceros laminados, los cuales necesitan pinturas de protección. En la unión de estos elementos con la estructura principal, se produce el contacto de dos metales con diferente potencial eléctrico resultando puntos sensibles frente a la corrosión.



Figuras 52 y 53. Interior de un cajón mixto de acero corten con importantes filtraciones de agua, habiendo degenerado en el deterioro del sistema de pintura y la oxidación del acero autopatinable, al no ser capaz éste de generar la capa de pátina debido a la falta de ventilación, la alta humedad y condensación interior del cajón.

En términos generales y para todos los aceros, las zonas próximas a las soldaduras suelen ser puntos débiles desde el punto de vista de la protección de las estructuras metálicas. El material de aportación de las soldaduras suele ser de igual o mayor calidad que las piezas a unir, y su composición mineralógica suele ser diferente a la de las piezas y, por tanto, de diferente potencial eléctrico, resultando estas zonas, por tanto, las de mayor debilidad frente a la corrosión, pudiéndose utilizar también como zonas de testigo o aviso.



Figura 54. Formación de óxido en elementos metálicos en las inmediaciones de las soldaduras por la diferencia de potencial eléctrico existente entre los materiales.



Figura 55. Concentración de óxido en las proximidades de la unión con soldadura debido a la diferente naturaleza del electrodo y el acero.

3. Daños generales

Se entiende como daños generales a aquellos daños que se producen de forma sistemática en los puentes, independientemente de la tipología estructural de los mismos. En rasgos generales, estos daños generales se pueden considerar los siguientes:

- Sumideros y sistemas de drenaje
- Juntas de dilatación
- Aparatos de apoyo
- Daños en subestructura por circulación de agua
- Problemas de gálibo
- Muros de suelo reforzado
- Sistemas de contención

Esta serie de deterioros, si bien presentan una importancia significativa dentro de las labores de conservación y mantenimiento de los puentes, no se van a desarrollar en el presente artículo de forma extensa, pues muchos de ellos se han tratado de forma particular en otra serie de publicaciones de la ATC, como son las publicaciones de *Juntas para puentes de carretera. Consideraciones prácticas* (ATC, Noviembre 2003), *Aparatos de apoyo de puentes* (A.I.P.C.R. - Comité Técnico de Puentes; 1996), *Impermeabilización y drenaje de tableros de puentes* (Asociación Técnica de Carreteras; septiembre 2003) y las *Jornadas sobre apoyos, juntas y equipamientos de puentes* (AIPCR-PIARC, Octubre 1996), así como la futura publicación de la monografía preparada por el grupo de trabajo de *Conservación y Mantenimiento de Aparatos de Apoyo, Juntas de Calzada y Sistemas de Drenaje en Puentes*, publicaciones que recogen sobradamente la problemática de las sumideros y sistemas de drenaje, de las juntas de dilatación, de los aparatos de apoyo y de los daños en la subestructura por circulación de agua.

Por tanto, simplemente se va a describir brevemente la problemática más habitual de los problemas de gálibo, de los muros de suelo reforzado y de los sistemas de contención. Así mismo, se incluirán una serie de comentarios e imágenes de los daños en los aparatos de apoyo, por su frecuencia y la importancia que suelen presentar.

3.1. Problemas de gálibo

Las estructuras con problema de gálibo suelen presentar, frecuentemente, golpes por impactos de vehículos que circulan con un gálibo excesivo por las carreteras del nivel inferior, si bien hay veces que las estructuras presentan un menor gálibo que el necesario.

Los golpes por impactos los sufren todas las tipologías estructurales, siempre que por debajo exista una vía de circulación con gálibo estricto o próximo a la calzada inferior, si bien los puentes de vigas y los puentes metálicos son los más sensibles a este tipo de daño. El resto de tipologías, losas, cajones, etc, suelen ser elementos muchos más masivos que los puentes metálicos y los puentes de vigas, produciéndose, generalmente, daños poco relevantes en dichas tipologías. En cambio, en los puentes metálicos y de vigas, los daños suelen resultar importantes. En los primeros los pequeños espesores de las chapas de fondo y almas, implican una importante debilidad de estas estructuras fuera de la zona de diafragmas intermedios, resultando bastante vulnerables frente a los impactos de vehículos.

En el caso de los puentes de vigas doble “T”, la nula capacidad a flexión transversal de los almas de las vigas, de menos de 20 cm en la mayoría de los casos, así como la nula, también, rigidez a torsión de las vigas, hace que en caso de impacto las vigas sufran daños importantes, incluso la completa rotura de las vigas.



Figura 56. Daños en cajón metálico por impacto de vehículos con exceso de gálibo. Se puede observar en la zona de losa, diferentes golpes sin apenas repercusión estructural.



Figura 57. Rotura completa de viga por vehículo circulando con exceso de gálibo.

3.2. Muros de suelo reforzado

Los muros de suelo reforzado se han utilizado frecuentemente en la construcción de carreteras, tanto como sustitutos de muros de hormigón armado en sostenimientos de tierras, como para la realización de la función de estribos.

La principal problemática que suelen presentar estos elementos, es la circulación de agua por su interior, produciéndose asientos y movimientos de las placas que pueden llegar a producir el colapso total o parcial de los muros.



Figuras 58 y 59. Movimientos en muros de suelo reforzado por circulación de agua por su interior, produciendo el lavado de finos y los consiguientes asientos y acompañamientos de las placas.

El otro daño principal que suelen presentar estos elementos son los asientos del terreno. Esta solución estructural para los estribos de los puentes, en numerosas ocasiones se utiliza en zonas con poca capacidad portante del terreno y con posibilidades de producirse asientos en la estructura. En estos casos es frecuente independizar el comportamiento estructural del tablero del terraplén, acudiendo a cimentaciones indirectas. El propio peso del terraplén acaba produciendo la consolidación y asiento del terreno, produciéndose asientos importantes en muchas ocasiones, lo que se traduce en daños en la plataforma y en el propio muro de suelo reforzado, al presentar una cierta rigidez en su plano, produciéndose el giro y desacoplamiento de las escamas, llegando incluso a producirse la rotura de las mismas.



Figuras 60 y 61. Problemas en muros de suelo reforzado por asiento del terraplén, produciendo la rotura parcial de placas, así como hundimientos locales de la plataforma.

3.3. Sistemas de contención

Los sistemas de contención de los puentes, independientemente de la efectividad de los mismos y de su ordenación normativa, suelen ser elementos que presentan daños por golpes e impactos, atendiendo a su propia funcionalidad.

Pero no son estos los daños más frecuentes que suelen presentar, sino aquellos asociados a la conservación y mantenimiento de los mismos. Estos daños se detectan en especial en los elementos de contención metálicos, tanto en pretilas como en pasamanos, si bien en los sistemas de contención de hormigón en las zonas de utilización de sales fundentes, también se suelen detectar daños por corrosión de las armaduras y por la degradación del hormigón.



Figuras 62 y 63. Deterioro de barandillas y pretilas de hormigón armado.



Figuras 64 y 65. Deterioro de sistemas de contención metálicos.

3.4. Aparatos de apoyo

Como ya se ha comentado anteriormente, existen publicaciones específicas de daños en aparatos de apoyos por lo que no se pretende en este apartado más que resaltar la importancia que presentan este tipo de elementos en el comportamiento estructural de los puentes, así como resaltar la gravedad y frecuencia con que estos daños y deterioros se producen, fundamentalmente por una insuficiente definición en proyecto, así como una mala puesta en obra. Los daños habituales de los aparatos de neopreno zunchado ya se han puesto de manifiesto en el apartado de puentes de vigas, por lo que no se volverá a repetir.

En los apoyos deslizantes se debe cuidar y revisar el adecuado diseño y reglaje de las bandejas deslizantes para permitir que se puedan absorber sin problemas los movimientos debidos a las deformaciones impuestas de la retracción, la fluencia, la acción térmica y el acortamiento elástico del hormigón, en caso de que el tesado se produzca sobre los apoyos definitivos.



Figura 66. Agotamiento de la carrera de la bandeja deslizante.

La falta de paralelismo en los aparatos de apoyo puede producir la reptación y expulsión de los mismos, como se vio en el apartado de puentes de vigas para los apoyos de neopreno zunchado. En el caso de aparatos de apoyo más sofisticados como pudieran ser los apoyos tipo POT, la falta de paralelismo de las caras suele producir la degradación y pinzamiento de la lámina de Teflón, produciendo daños irreversibles en los apoyos.

También, un mal diseño de esta tipología de apoyos, puede producir la flexión de la chapa de confinamiento del apoyo, produciendo la correspondiente deformación de la misma, pudiendo llegar a producirse la expulsión de la lámina de deslizante de los apoyos.



Figura 67. Rasgado y expulsión de la lámina de teflón, por falta de paralelismo entre las caras de apoyo del POT.



Figura 68. Rebosamiento de la lámina de teflón del apoyo tipo POT, por posible flexión del pistón de confinamiento.

4. Referencias

- [1] HAMILL, L. "Bridge Hydraulics". *E & F Spon. London an New York. 1999.*
- [2] "Pont-Caisson en béton précontraint". *SETRA. 2005.*
- [3] MATHIVAT, JACQUES. "Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos". *Editores técnicos asociados. Barcelona. 1980.*
- [4] "Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras. RPX-95". Ministerio de Fomento. 1996.