VIDA UTIL DE PUENTES

Guy GRATTESAT

Ingénieur Général des Ponts et Chaussées,
Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
París, Francia

Traducido por:
Fernando BAQUEDANO, Ing. de Caminos
IETcc

560-24

Guy Grattèsat es Vice-Presidente del Grupo Francés de IABSE. Es autor de varios grandes puentes en París y otros lugares. Como jefe de la Oficina central de Puentes, en el Ministerio de Transportes, tuvo que supervisar numerosos proyectos. Ahora, como Inspecteur Général, es consultado en todas las etapas de proyecto, construcción, conservación y reparación de puentes. También participa en la elaboración de Códigos técnicos en Francia y en Organismos internacionales, ISO, EEC, JCSS, etc. Sus lecciones en la Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, han sido publicadas con el título de «Conception des Ponts» (Concepción de Puentes).

RESUMEN

La vida residual de los puentes depende del estado de la estructura y de sus características funcionales, así como de las modificaciones previstas. Depende principalmente de las medidas que se tomen para prolongarla. Generalmente resulta más económico reparar y, eventualmente, reforzar un puente que sustituirlo. La decisión se toma en cada caso particular. Algunas veces es difícil tomarla por causa de las incertidumbres residuales. Se trata un tema complejo que requiere mucha investigación y cooperación internacional.

1. INTRODUCCION

En Europa está muy extendida la creencia de que los puentes tienen un período de vida muy largo. Esta opinión se basa en el hecho de que diversos puentes y acueductos, construidos por los romanos hace 2.000 años, aún sobreviven. En muchos países europeos, gran parte de los puentes existentes son de mampostería y parecen soportar la prueba del tiempo.

Los otros puentes, aun cuando sean más ligeros, generalmente producen una sensación de resistencia y robustez que les da una apariencia de gran durabilidad.

Hundimiento del puente de Tours, en el Loira, el 9 de abril de 1978.

Otra idea corriente es que cuanto más antiguo es un puente mayor es su vida residual, puesto que ha resistido a todas las agresiones. Esto puede ser parcialmente cierto en puentes de piedra pero, en muchos casos los puentes, así como otras construcciones y los seres vivientes, se debilitan y deterioran con los años.

Algunos accidentes espectaculares muestran que la seguridad de los puentes no es absoluta. El colapso del puente de Point Pleasant en Estados Unidos de Norteamérica, en 1967, así como el de Reichsbrücke en Viena, en 1976, produjeron una considerable conmoción en la opinión pública. En Francia, en 1978, el colapso repentino de varios arcos de un puente de mampostería del siglo XVIII en Tours, sobre el río Loire, causó gran emoción. Por milagro no se produjeron víctimas, pero pudo haber docenas de ellas si, en ese momento, hubiesen circulado muchos vehículos sobre el puente.

Afortunadamente, los colapsos en puentes son muy escasos y su probabilidad muy baja, mucho menor que la de accidentes de carretera. Sin embargo, son mal admitidos por la opinión pública, que los considera como inaceptables.

Los ingenieros responsables de los puentes saben ciertamente que la vida de éstos está lejos de ser infinita. Conocen, lo cual es más importante, que su vida residual depende de su inspección y conservación. La razón por la que los accidentes de puentes son tan escasos no es otra que la pronta reparación o clausura de aquellos puentes que ofrecen peligro de colapso.

2. EXPECTATIVA DE VIDA MEDIA

¿Es posible evaluar el período de vida que se espera de los puentes?

Esta pregunta surgió durante la elaboración de los nuevos principios de seguridad estructural, basados en conceptos probabilistas. La estimación del tiempo de vida de una estructura es un elemento importante para la valoración de la probabilidad de fallo, así como para la determinación del período de retorno medio de las diferentes acciones. Se ha convenido que la vida esperada para puentes es de alrededor de 100 a 200 años. Pero este valor es más un «período de referencia» para ser usado en los cálculos que un verdadero período de vida esperado. Se aplica sólo a la construcción de nuevos puentes, es decir, a estructuras que son muy distintas de las que les precedieron.

Esta pregunta también surge, para prever el correspondiente costo anual, en la elaboración de un programa de sustitución de puentes existentes. Se han realizado algunos estudios sobre este particular en diferentes países. Por ejemplo, el informe OCDE sobre «conservación de puentes», publicado en 1981, cita un estudio realizado en Alemania en

Rhineland-Palatinate Land en el que se calcula el número de puentes a sustituir cada año hasta el 2037. Este estudio se basa en una vida media de 60 años. La vida residual se considera como la diferencia entre la vida media y la edad del puente. Este método puede dar una estimación aproximada de las sustituciones por hacer; sin embargo, los resultados podrían ser marcadamente distintos, dependiendo de la duración de la vida media elegida. El problema está en que los datos disponibles son insuficientes para evaluar exactamente la vida media de los puentes.

2.1. Edad media de los puentes existentes

Un primer paso consiste en analizar el inventario de puentes existentes para determinar la edad de los mismos. En Europa, es obvio que esta edad varía considerablemente desde los puentes romanos hasta los más recientes. Es, por lo tanto, esencial establecer distinciones entre los diferentes tipos de estructuras. De algunos estudios se deduce que, en Francia, la edad media de los puentes existentes es de alrededor de 100 a 200 años para puentes de mampostería, que constituyen el 75 % del inventario total; alrededor de 100 años para puentes metálicos y de unos 40 años para puentes de hormigón armado. Pero estos estudios están muy limitados en la actualidad y no es posible deducir información exacta de ellos.

Obviamente, hay que hacer una distinción fundamental entre la edad media y el período de vida media de un determinado tipo de puente.

En la historia de los puentes de mampostería se refleja que un gran número de puentes romanos y de la Edad Media fueron destruidos, algunas veces pocos años después de su construcción. La vida media de los puentes de mampostería es, por lo tanto, claramente más corta que la edad media de los existentes.

Por el contrario, la edad más alta de los puentes de hormigón pretensado es de unos 40 años construyéndose muchos nuevos cada año. Por lo tanto, la edad media de este tipo de puentes es menor de 20 años. Afortunadamente, es cierto que el período de vida media de los mismos será mucho más largo que su actual edad media.

Sin duda, es muy útil conocer mejor la edad media de los diferentes tipos de puentes; no obstante, esto es solamente un elemento parcial que no permite, por sí mismo, evaluar la vida residual de aquéllos.

2.2. Tasa anual de sustitución

Otro paso consiste en considerar la tasa anual de sustitución de los puentes; esto es, la relación entre el número de puentes sustituidos cada año

y el número total de puentes existentes. Se ha hecho una encuesta sobre este asunto en los países de la OCDE y sus resultados se dan en el informe sobre «conservación de puentes». Las tasas nacionales van de 0,02 a 1,6 %, con una mayoría de valores comprendidos entre 0,2 y 0,4 %. Teóricamente, se podría deducir de estos últimos valores que la vida media de los puentes, que es la inversa de la tasa de sustitución, se sitúa entre 500 y 250 años. Obviamente, esta conclusión no significa nada, porque la población de puentes no es nada homogénea. Ya que el período de vida de la mayoría de los puentes es ciertamente más corta, parece que el costo anual de las sustituciones no está determinado por la edad de aquéllos, sino por otras consideraciones. Sin embargo, como cada vez hay más puentes que necesitan sustitución, es muy posible que este costo anual tendrá que incrementarse considerablemente en el futuro con el fin de evitar limitaciones del tráfico o accidentes en la red de carreteras.

2.3. Causas y razones de la sustitución

Para tratar de evaluar con más precisión la vida residual es muy instructivo analizar las causas y razones del ocaso de los puentes. Aquéllas se pueden clasificar en diferentes categorías:

- colapsos de la estructura, debido a errores en el proyecto o ejecución, o al deterioro de los materiales;
- colapsos debidos al tráfico;
- colapsos debidos a acciones naturales, tal como socavación de cimentaciones; acción de viento sobre algunos puentes metálicos;
- colapsos debidos a acciones accidentales, terremotos, impactos de embarcaciones o vehículos, deslizamiento de tierras, avalanchas, etcétera;
- demolición intencional por motivos estructurales con objeto de evitar el colapso;
- demolición intencional por motivos funcionales: que el puente sea demasiado débil o demasiado estrecho; que tenga escaso gálibo sobre una carretera o un río navegable, etc.

En muchos países, incluida Francia, durante las guerras se destruyeron un gran número de puentes. Por ello, sus diagramas de población de puentes, agrupados por edades, son muy diferentes de los de las regiones que no han sufrido los efectos de las guerras.

En la historia de los puentes se puede observar que los colapsos debidos al tráfico son relativamente escasos. Ocurrieron solamente cuando hubo un defecto importante en la estructura o

cuando un vehículo pesado intentó cruzar el puente a pesar de la limitación de carga. Afortunadamente, las demoliciones intencionales son mucho más numerosas que los colapsos accidentales.

Estos diversos factores influyen de forma diferente según el tipo de puente.

Los puentes de madera han sido muy numerosos en el pasado y han desaparecido casi por completo, salvo en ciertas regiones, o bien, han sido destruidos por riadas; acción expansiva de hielo o fuego; ataques físicos, químicos o biológicos, o bien han sido sustituidos por su escasa capacidad portante.

Casi todos los colapsos de puentes de mampostería se deben a fallo de las cimentaciones, principalmente a causa de socavamiento, en especial cuando estaban sustentados por pilotes de madera, como en el caso del puente Tours. Muchos de ellos han sido sustituidos porque eran demasiado estrechos o de escaso gálibo sobre un río navegable.

Un gran número de otros puentes, algunos de ellos aún jóvenes, han resultado destruidos por sus cimentaciones defectuosas. Tales accidentes, que no dependen del material de la superestructura sino solamente del tipo de cimentación, todavía ocurren en la actualidad como resultado de socavación y erosión durante las riadas o por cambios en la capacidad portante del terreno.

En ciertas regiones, los terremotos han causado el colapso de muchos puentes.

La vida media de los primeros puentes metálicos que se construyeron en hierro fundido ha sido algo corta. Colapsaron o han sido sustituidos por la fragilidad del metal. Su colapso se ha debido muchas veces a vibraciones y variaciones de temperatura. En París, en 1939, un puente de arco de hierro fundido sobre el río Sena fue golpeado por un barco y colapsó instantáneamente. Después de esto, se sustituyeron varios puentes del mismo tipo para evitar un accidente similar.

En otros tipos de puentes se produjeron colapsos totales o parciales debidos a impactos de embarcaciones o vehículos contra los soportes o contra la superestructura, cuando estos elementos no eran suficientemente robustos.

Durante el siglo XIX hubo accidentes debidos a la corrosión y efectos de viento en puentes colgantes. Ha sido necesario sustituir muchos de los restantes por la imposibilidad de reforzarlos. Incluso en el siglo XX, se han producido algunos accidentes por la acción del viento. Todo ingeniero de puentes conoce la aventura del puente Tacoma, que colapsó en 1940 después de una especialmente corta vida de servicio.

Plataforma adaptable al brazo de una pala hidráulica.

En puentes de hierro y de acero, contruidos desde el siglo XIX, la principal causa de desórdenes ha sido la corrosión. Los efectos de la corrosión han sido muy distintos, según los diferentes elementos, la configuración y la posibilidad y calidad de conservación de la estructura. Generalmente ha sido posible reparar o sustituir elementos en mal estado y evitar accidentes. Por el contrario, los fenómenos de fatiga han causado algunos colapsos sin preaviso.

Los puentes de hormigón armado han acusado la fisuración del hormigón y la corrosión de armaduras, especialmente aquéllos de comienzo de siglo por su escaso recubrimiento. Cuando el deterioro fue muy importante el puente tuvo que ser sustituido. En algunos casos, el hormigón fue demasiado pobre o se deterioró debido a fenómenos químicos, en puentes situados en ambientes muy agresivos o cuando el cemento o los áridos eran de mala calidad. Algunos problemas provinieron también de la acción hielo-deshielo y, más raramente, por reacción álcali entre el cemento y ciertos tipos de áridos.

Algunos de los primeros puentes de acero soldados han colapsado por fenómenos de rotura frágil, superados en la actualidad y que pueden ser eli-

minados con ciertas precauciones bien conocidas respecto a la calidad de acero y método de soldadura.

Es demasiado pronto para analizar las razones de la demolición de puentes de hormigón pretensado y, consecuentemente, es imposible predecir su vida residual. En Francia, el primer puente construido por Freyssinet sobre el río Marne, entre 1946 y 1950, está aún en servicio y en buenas condiciones después de algunas reparaciones parciales. Los pocos puentes que se han demolido eran más recientes. Sus defectos provenían de fallos de proyecto y mala evaluación de los esfuerzos o de falta de precauciones necesarias durante la construcción. Algunas veces la calidad del hormigón no fue suficiente, o la posición de los tendones y su protección contra la corrosión —especialmente contra la corrosión bajo tensión— no habían sido cuidadosamente controladas.

Es evidente que el agua es uno de los peores enemigos de los puentes. En muchos casos, cualquiera que sea el material del puente, los problemas se han debido a filtración de agua dentro de la estructura. Por ello, en muchos países de Europa, los tableros se protegen por medio de capas impermeabilizantes. Esta precaución se considera como muy importante y necesaria. La realidad es que las degradaciones observadas son mucho más importantes cuando las capas impermeables son de peor calidad o están deterioradas. Por el contrario, cuando cumplen su función correctamente, la estructura permanece en mucho mejor estado.

Sería ciertamente muy útil e instructivo analizar, en detalle y cuantitativamente, las razones de la demolición de puentes en el pasado. Se han hecho algunos estudios en este sentido, por ejemplo el de D.W. Smith citado en el informe de la OCDE «evaluación de la capacidad portante de puentes» en el que se examinan las causas de 143 colapsos entre 1847 y 1975. En él se indica que el 60 % de los colapsos se deben a fenómenos naturales. Un inventario más completo, incluyendo las demoliciones intencionales, requeriría una larga investigación histórica y mucha información. Sin embargo, se pueden mantener al día, en cada país, las listas de sustituciones anuales de puentes, con los motivos exactos de cada decisión.

La conclusión de este breve repaso es que no es posible evaluar la vida residual de un puente teniendo en cuenta sólo su edad y su período de vida media. Una valoración completa, como la que se hizo en Rhineland-Palatinate, puede ser útil para trazar programas futuros, ya que sería algo ilógico ordenar la baja de un puente que alcanza los 60 ó 100 años. Es absolutamente necesario examinar el problema en cada caso.

2.4. Previsiones para el futuro

Para estimar la vida residual de los puentes, no es suficiente analizar las experiencias pasadas. Se

debe considerar que las agresiones a las que están expuestos serán seguramente peores en el futuro.

El número y peso de los vehículos de mercancías se han incrementado considerablemente en los últimos años. La demanda de autorización de vehículos muy pesados y de transportes excepcionales es cada vez mayor. Es posible comprobar, en cierto modo, la capacidad de carga y evaluar los riesgos de deterioro por fatiga de los puentes existentes bajo el actual nivel de tráfico. Sin embargo, no es posible predecir el futuro. Si el número y peso de los vehículos crece más aún en los años venideros y si hay que adaptar nuevas rutas al transporte de cargas excepcionales más pesadas, será necesario sustituir muchos puentes que ahora están en buen estado y cuya potencial vida residual se reducirá. En ese tema, una de las conclusiones del Simposio IABSE, que tuvo lugar en Cambridge en 1975, fue que las autoridades responsables de los puentes tuvieron que advertir a los Gobiernos acerca de las consecuencias del aumento de peso de los vehículos muy pesados sobre la seguridad y costo de refuerzo de las estructuras.

Será también necesario, si aumenta el tráfico, ensanchar un cierto número de puentes. En ciertos casos, se puede ensanchar el tablero y revisar y reforzar los elementos de apoyo. En otros habrá que construir un nuevo puente al lado del anterior. A veces, la única solución será demoler el puente y sustituirlo por otro más amplio. En este caso, también la vida residual se acortará voluntariamente.

Respecto a las otras acciones variables, especialmente las del viento, se ha progresado bastante y sus efectos son mucho mejor conocidos que en el pasado, en particular, cuando se ha reconocido que aquéllas tienen un carácter probabilista y no determinista. Sin embargo, las discusiones que tienen lugar en el Comité Conjunto de Seguridad Estructural y en la Organización Internacional de Normalización (ISO) para fijar sus valores característicos, así como las discrepancias entre los códigos nacionales, indican que nuestro conocimiento es insuficiente en este tema.

El peligro de algunas acciones accidentales, como las colisiones, aumentarán con el tráfico. Este puede reducirse por medio de medidas de protección, que no son absolutamente eficaces y no pueden llevarse a cabo en la práctica en todas las estructuras.

Las agresiones químicas han aumentado, en los últimos años, debido a la polución ambiental y, principalmente, al uso generalizado de sales descongelantes para asegurar el tráfico despejado en época de invierno. Estas agresiones probablemente aumentarán en el futuro, de tal modo que el

deterioro de los materiales se acelerará. Evidentemente, sus consecuencias dependerán del material y de la ubicación del puente.

Aparecen otros nuevos peligros. Por ejemplo, desde hace algún tiempo han aumentado considerablemente las extracciones de materiales de los lechos de los ríos por necesidades de la construcción y de la agricultura. Si no se limita el volumen de tales extracciones, las cimentaciones de los puentes pueden verse seriamente atacadas debido al descenso del lecho del río y pueden producirse colapsos.

Pero, por el contrario, es posible que también aparezcan nuevas formas de protección y remedios contra estas agresiones, gracias a la mejora de los medios de conservación, reparación y refuerzo y a las medidas de protección que pueden tomar las autoridades.

Finalmente, es evidente que la vida residual de un puente no viene determinada exactamente: depende esencialmente de lo que se haga para alargarla o acortarla.

3. DECISIONES INDIVIDUALES

En la práctica, las decisiones se toman, en cada caso particular, a la vista de la situación real del puente y de los cambios previstos en el futuro.

3.1. Resultados de las Inspecciones

En muchos países, los puentes se inspeccionan periódicamente. En general hay niveles diferentes de inspección: inspecciones someras, efectuadas permanentemente por el personal ordinario de conservación, para detectar los defectos aparentes; inspecciones principales efectuadas por personal entrenado, a intervalos de uno o dos años en caso de inspección general, y de tres a cinco años para inspecciones más cuidadas; inspecciones especiales hechas en circunstancias extraordinarias con vistas a una revalorización técnica de la estructura.

En los últimos años, estas inspecciones se han realizado más regular y cuidadosamente, ya que los ingenieros encargados de los puentes se han percatado del estado de peligro de ciertas estructuras, al enterarse de graves accidentes ocurridos en sus respectivos países o en el extranjero. Por otra parte, el aumento de las peticiones de licencias de vehículos pesados les obligó a comprobar la capacidad portante de muchos puentes. Además, los adelantos en los métodos de inspección han enseñado a detectar defectos que no habían sido advertidos con anterioridad. Por ejemplo, en Francia, se han realizado sistemáticamente inspecciones bajo agua por buzos durante los últimos 25 años. Estas inspecciones de las partes

más bajas de los soportes se hacen regularmente, algunas veces con la ayuda de cámaras de televisión, y han detectado defectos que posiblemente habrían causado el colapso del puente si no se hubieran advertido y reparado a tiempo. En cuanto a la superestructura, los adelantos de los medios de acceso y, especialmente, el uso de equipo de inspección móvil para operar desde el tablero del puente, ha hecho posible inspeccionar en detalle aquellas partes del puente que anteriormente eran difíciles de visitar. Se han descubierto muchos defectos visibles y se han previsto inspecciones más detalladas. Las técnicas modernas de inspección han descubierto otros defectos ocultos y han obligado a tomar medidas de conservación y seguridad. Este es el motivo por el que el número de problemas ha aumentado aparentemente y con rapidez en los últimos años. Muchos de estos desórdenes existían desde hace tiempo, pero no habían sido detectados.

Dependiendo de los resultados de estas inspecciones, las autoridades responsables deben tomar decisiones sobre el destino del puente. Cuando no hay problemas y no es necesaria ninguna mejora funcional, lo único que hay que hacer es llevar a cabo la conservación normal del puente. Cuando se descubren errores, hay que escoger entre reparaciones (eventualmente con limitación de peso), y sustitución del puente. Cuando los problemas son importantes se toman medidas inmediatas: limitación del tráfico o clausura del puente y, posiblemente, precauciones contra la caída de trozos debajo del puente. Cuando son necesarias mejoras funcionales, tienen que examinarse las posibilidades de refuerzo o de ensanchamiento del puente.

En Francia, hay dos programas anuales relacionados con los puentes existentes. El primero, dedicado a la rehabilitación de aquellos puentes que necesitan reparaciones; el segundo, a la mejora de las características funcionales de aquellos puentes localizados en carreteras especiales. En muchos casos, los puentes necesitan tanto reparaciones estructurales como mejoras funcionales.

Cuando el estado del puente es evidentemente tan malo que es imposible su rehabilitación, decidir la sustitución es imperativo. Sin embargo, generalmente la elección entre reparación, refuerzo y sustitución no es evidente y deben emprenderse estudios comparativos.

3.2. Datos e información

En principio, el problema consiste en recoger y ordenar todos los datos referentes al puente y en encontrar el proyecto original y los documentos acerca de las reparaciones y modificaciones efectuadas desde que fue construido. Los archivos son casi siempre insuficientes o están muy incompletos y los planos deben ser rehechos con las dimensiones exteriores de los elementos accesibles de la estructura. Aun cuando los documentos existentes parezcan correctos, deben ser examinados con atención, porque ocurre que las dimensiones reales son distintas de las de los planos antiguos.

Todos los fallos detectados durante las inspecciones, tales como deformaciones, corrosión, fisuras, etcétera, deben analizarse a fin de obtener una primera valoración técnica del estado del puente.

3.3. Evaluación de la capacidad portante

Si parece posible mantener el puente, hay que evaluar su capacidad portante. Excepto en puentes recientes, las especificaciones de proyecto han cambiado desde su construcción. Las cargas establecidas en los códigos han aumentado con el número y peso de los vehículos. Las tensiones admisibles también han aumentado, sin embargo, el resultado del cálculo generalmente aparece más desfavorable que el cálculo original. El nivel de seguridad parece ser insuficiente comparado con el de los puentes nuevos. En ese tema, se puede apuntar que hay diferencias considerables e injustificadas entre los códigos nacionales, tanto en los sistemas de cargas de tráfico como en los elementos de seguridad a tener en cuenta en el proyecto.

Antes de tomar la decisión de reforzar o de sustituir, es aconsejable analizar el problema más ampliamente. En este aspecto es particularmente útil hacer uso de los nuevos principios de seguridad. Se ha demostrado que el concepto de «nivel de seguridad» es muy complejo y no puede expresarse cuantitativamente de una forma sencilla.

Primeramente, debe hacerse una distinción entre estados límites últimos y de servicio. Gracias a esta distinción, que no existió en las especificaciones anteriores, es posible tratar de diferenciar los efectos de las acciones que son realmente peligrosas y los de aquellas que podrían tener únicamente consecuencias menores.

En segundo lugar, es también útil referirse a los conceptos probabilistas para evaluar los parámetros aleatorios a tener en cuenta, que no son iguales a los de una estructura de nueva construcción. Cuando el puente existe, las cargas permanentes se conocen con más precisión (si las dimensiones reales han sido comprobadas), y sólo se tienen en cuenta las incertidumbres residuales. En cuanto a las acciones variables, se puede considerar que la vida residual del puente existente será más corta que el tiempo de vida de un puente nuevo. Por tanto, el período de referencia y, consecuentemente, los valores característicos de las acciones deben reducirse. Sin embargo, la evaluación de estos períodos de vida no es suficientemente segura para llegar a conclusiones precisas. Para la combinación de acciones, la probabilidad de ocurrencia simultánea de valores desfavorables de algunas acciones independientes es pequeña, por lo que los valores de algunas de las acciones variables pueden reducirse, de acuerdo con los documentos del JCSS e ISO. Por ejemplo, sería excesivo combinar la carga más pesada con la acción de viento más intensa.

Respecto a esfuerzos y resistencias, es importante conocer el estado real de la estructura. La resistencia de los materiales puede medirse por ensayos de laboratorio de algunas muestras extraídas de la obra. El comportamiento mecánico puede apreciarse por el aspecto externo y por las flechas de los elementos portantes y, también, por un riguroso examen de los apoyos y juntas de expansión. En este momento puede ser necesario efectuar investigaciones más completas para determinar el estado interno y el comportamiento de la estructura. Algunos métodos de ensayos no-destructivos pueden dar valiosa información: esclerómetro (rebound-hammer), pachómetro (magnetic detector), instrumentos de ultra-sonido, medidor de fisuras, bandas extensométricas, gammagrafía, células de carga, etc. Con técnicas modernas, en ciertos casos es posible medir las tensiones totales en el acero y hormigón y no solamente la variación de las tensiones por efecto de la carga.

Estas investigaciones complementarias son un tanto costosas y deben usarse solamente cuando resultan imprescindibles, en íntima colaboración con la oficina de proyecto.

El análisis estructural se efectuará en el puente en su estado real y, eventualmente, en su estado después de la reparación o refuerzo. Hasta donde sea posible, el cálculo se realizará teniendo en cuenta el comportamiento real de la estructura, influencia de la fisuración, las fuerzas de rozamiento, la redistribución de tensiones, etc. Con los métodos actuales este cálculo será más preciso que los cálculos originales.

A partir de las conclusiones del estudio anterior, se hace una evaluación de la capacidad portante. Debe reconocerse que este juicio no es tan sencillo

como parece. No es seguro que la imposición de un límite de peso para un vehículo pueda evitar tensiones peligrosas, en ciertos elementos, por las distribuciones aleatorias de cargas.

Los resultados del cálculo se pueden confirmar por medio de pruebas de carga estática a escala real que permiten una comparación entre las deformaciones teóricas y las halladas experimentalmente. También se puede hacer una comparación entre las tensiones calculadas y medidas en determinadas secciones.

Pruebas dinámicas, como las que se hacen en Bélgica, tal vez podrían dar información complementaria acerca del estado y evolución de la estructura.

Estos ensayos son útiles para comprobar el comportamiento global del puente y para detectar los defectos que no se han tenido en cuenta en el estudio teórico. Sin embargo, no permiten determinar la máxima capacidad portante del puente (ya que las cargas de prueba están necesariamente por debajo de la carga última), así como tampoco su resistencia frente a una combinación de varias acciones diferentes. Y desde luego, no dicen nada del comportamiento a fatiga de la estructura.

Uno de los problemas que surgen en este tema es la fijación de las tensiones admisibles o factores parciales de seguridad, que no son necesariamente los mismos que los de las estructuras nuevas. Cuando los datos que se refieren a un puente existente son suficientes para disminuir las incertidumbres, se puede considerar que su «nivel de seguridad» es el mismo que el de un puente nuevo, aun cuando los valores numéricos de los factores de seguridad utilizados en el cálculo sean más bajos.

Hasta ahora no hay recomendación internacional sobre esta materia que merece ser investigada por su utilidad.

3.4. Defectos, reparaciones y modificaciones

Cuando la conclusión de estos estudios es favorable, se completa el proyecto para reparar y, si es necesario, reforzar o modificar el puente.

Es muy importante no sólo reparar los defectos visibles, sino encontrar sus causas para subsanarlas y evitar deterioros posteriores. Debe determinarse si las degradaciones se deben al material propiamente dicho o a la configuración de la estructura; a movimientos de las cimentaciones; si las fisuras son normales o no, etcétera.

También es necesario examinar todas las repercusiones del trabajo de rehabilitación programado, muchas de las cuales pueden ser desfavorables e

incluso peligrosas. Por ejemplo, cuando se necesitan tendones pretensados adicionales, no sólo se debe comprobar que en determinadas secciones se eliminarán las tensiones de tracción, sino también que no aparecerán tensiones peligrosas en ninguna sección.

Las posibles reparaciones y modificaciones son sustancialmente diferentes según el tipo de estructura.

Los puentes de mampostería están principalmente expuestos a problemas en su cimentación. Los arcos son generalmente muy robustos y capaces de soportar cargas muy pesadas. A menudo es posible colocar una losa de hormigón armado sobre los arcos para ensanchar la calzada, siempre que la cimentación sea lo suficientemente resistente. La vida residual de estos puentes puede ser muy larga si su cimentación está convenientemente conservada y, si es necesario, reparada y reforzada. En algunos casos, los efectos de las vibraciones por el tráfico han causado fisuras y desprendimiento de piedras, lo cual generalmente no es preocupante y puede ser fácilmente reparado si las pilas y estribos están sanos.

Los defectos en las cimentaciones son peligrosas en todos los tipos de puentes. Estos pueden detectarse solamente en forma indirecta, a través de las deformaciones en los soportes y en la estructura. Con frecuencia es difícil determinar su causa y su reparación correspondiente en general es muy costosa. No obstante, debe hacerse sin vacilación para evitar el posible colapso del puente. Cuando la superestructura debe ser sustituida por motivos estructurales o funcionales, a veces se aconseja reutilizar los soportes que se encuentran en buen estado. Esto puede aceptarse sólo si se averigua que la cimentación existente es suficientemente resistente y durable, ya que no sería razonable construir una nueva superestructura sobre cimentaciones defectuosas.

En puentes de acero, los componentes principalmente afectados por corrosión pueden ser, a me-

nudo, reparados y reforzados. Es posible reforzar los elementos demasiado débiles por medio de chapas soldadas o sustituirlos cuando están fuertemente deteriorados. Por tanto, la vida residual de los puentes de acero se puede prolongar por mucho tiempo. Sin embargo, aparecen ciertas dificultades cuando algunas partes de la estructura no son accesibles o cuando las piezas metálicas están embebidas en la mampostería u hormigón. En este caso es aconsejable demoler y reconstruir aquellas partes del puente que pueden ser peligrosas. Otros problemas serios surgen por los fenómenos de fatiga y de corrosión por fatiga y es casi siempre necesario reforzar o sustituir los elementos afectados por esta causa.

Respecto a los puentes colgantes, a pesar de los adelantos de las técnicas magnético-inductivas y, más recientemente, en prospección acústica, no es posible evaluar exactamente la cantidad de corrosión y la rotura de alambres en los cables.

Si se advierte que la resistencia del cable es demasiado débil, la única solución es sustituirlo, lo cual es difícil y costoso. Problemas similares se presentan en los puentes atirantados, por ello es preferible separar los cables en forma de cuerdas de arpa, para poder sustituirlos individualmente si es necesario.

Las jácenas y vigas de hormigón armado en la actualidad pueden ser reparadas más fácil y eficazmente como resultado de las nuevas técnicas y productos de la química moderna. Generalmente es posible rehabilitar la estructura cuando los desórdenes no son demasiado importantes, pero es muy difícil reforzarla y prácticamente imposible ensancharla. Recientemente, en Francia, un puente de hormigón armado que no se podía clausurar ha sido reforzado por medio de cables pretensados y su costo ha sido prácticamente el mismo que el de una superestructura nueva.

Ya existen algunos ejemplos de reparación y refuerzo de puentes de hormigón pretensado. En cada caso, el método debe ser proyectado y detallado por especialistas.

No es posible prever la vida residual de estos puentes, pero sería deseable encontrar nuevas técnicas de inspección y reparación para prolongarla.

En cualquier caso, para evitar nuevos desórdenes es necesario impedir la filtración de agua en el tablero y protegerlo por medio de una capa impermeabilizante eficaz y duradera.

3.5. Criterios financieros y de seguridad

Cuando se completa el proyecto y se conoce el costo aproximado de los trabajos, surge el dilema de si se repara o se sustituye el puente.

La respuesta es inmediata cuando los elementos principales de la estructura están en buenas condiciones y sólo son necesarias reparaciones o refuerzos parciales. En muchos casos, la solución conveniente es aumentar la vida residual del puente, sustituyendo o reforzando algunos elementos deteriorados. Algunas veces la capacidad portante puede aumentarse considerablemente reduciendo la carga permanente, por ejemplo, sustituyendo una losa pesada del tablero por otra más ligera, en la que se emplean materiales como el hormigón ligero o aluminio.

La decisión es más difícil cuando el coste de los trabajos es muy alto. Este coste debe compararse después con el de un puente nuevo, al que, por supuesto, hay que agregar los costes de demolición y suplementarios que se derivan del trastorno de tráfico. Estos costes suplementarios son, a veces, tan importantes que el coste total de reconstrucción es mucho más elevado que el de un puente nuevo.

Para esta comparación financiera se emplea el concepto de «descuento», que expresa el hecho de que los costes futuros son de más bajo valor presente que los costes actuales. Por ejemplo, un cálculo hecho en el informe de la O.C.D.E. sobre conservación muestra que si la reconstrucción de un puente se aplaza por 15 ó 20 años, es más económico hacer trabajos de reparación hasta el 40 % del costo de sustitución, si la tasa de descuento es superior al 3 %. Generalmente la tasa de descuento es efectivamente superior al 3 % y la vida residual debe ser superior a 20 años. La conclusión es que, desde el punto de vista económico, es preferible prolongar la vida residual de un puente que sustituirlo, aun si el correspondiente coste es alto.

Sin embargo, este punto de vista es secundario si se le compara con otro más importante como es el de garantizar la seguridad. La principal dificultad que se encuentra a menudo para tomar una decisión es que los resultados de las investigaciones y cálculos no son completamente seguros y que subsisten algunas incertidumbres. En efecto, estos estudios pueden probar que la estructura no es segura, pero no pueden dar una garantía total de que será segura después de repararla. El ingeniero sabe que no puede alcanzarse la seguridad absoluta.

Es necesario, por tanto, imaginar escenarios de peligro y estrategias contra los riesgos potenciales, buscando los principales factores determinantes y la mayor debilidad que podría amenazar al puente.

Las principales dudas afectan a aquellas partes que no pueden ser inspeccionadas y se comprueban sólo por vías indirectas. El principal peligro se sitúa en los elementos de apoyo cuyo fallo

puede dar lugar al colapso repentino sin ningún aviso, por ejemplo:

- estado de las cimentaciones que sólo puede evaluarse parcial e indirectamente;
- estado de los alambres interiores de los cables de puentes colgantes, y de sus anclajes;
- estado de los elementos sujetos a fenómenos de fatiga;
- corrosión o rotura de tendones pretensados.

Los métodos y técnicas de investigación han mejorado mucho en los últimos años. Sin embargo, se necesita más investigación y hay que conseguir nuevos adelantos para reducir las incertidumbres residuales y llegar a datos cualitativos y, a ser posible cuantitativos, fiables.

No es suficiente utilizar a intervalos espaciados instrumentos y métodos avanzados. Es deseable encontrar procedimientos más rápidos y económicos, tales como la detección acústica o la gammascopía para cables y tendones, que podrían permitir una inspección más completa y más frecuente.

A pesar de los progresos que se pueden esperar en este campo, las dudas subsistirán por mucho tiempo y habrá que hacer un balance entre el riesgo residual aceptable y las consideraciones financieras que llevan a prolongar la vida de un puente.

Dado que los recursos disponibles generalmente son limitados, las autoridades responsables tienen que hacer elecciones difíciles en el momento de establecer programas y prioridades.

Algunas decisiones son obligatorias:

- La protección del patrimonio nacional de puentes obliga a preservar el mayor tiempo posible todos los puentes de índole histórica o artística, aun cuando el coste de su conservación y rehabilitación sea muy alto. Tal es el caso de casi todos los puentes anteriores al siglo XIX y de algunos más recientes que tienen un valor arquitectónico o que han representado un nuevo paso en la evolución técnica.
- Por el contrario, aquellos que son funcionalmente insuficientes y que no pueden ser modificados o que estructuralmente están en tan mal estado que no pueden ser reparados se sustituirán. Asimismo lo serán aquellos que necesitaran reparaciones muy costosas seguidas de gastos permanentes de vigilancia y conservación.

Entre estos dos grupos, hay muchos puentes cuya vida residual debe prolongarse por razones económicas. Las reparaciones y mejoras necesarias deben llevarse a cabo para garantizar la mayor seguridad posible, evitar nuevos problemas y re-

ducir posteriores costes de conservación. En algunos casos, hay que limitar las cargas.

Antes de realizar las reparaciones o cuando quedan algunas dudas acerca de su eficacia, se efectuarán inspecciones complementarias y se tomarán medidas preventivas urgentes que pueden consistir en limitaciones de carga o en la clausura del puente si es necesario.

4. CONCLUSIONES

En el estado actual del conocimiento, no es posible evaluar con precisión la vida residual de los puentes. Es sólo un asunto de criterio de ingeniería.

En el caso de puentes recientes, generalmente se estima que su tiempo de vida será de alrededor de 100 años, pero esta predicción es obviamente más subjetiva que racional. En los otros casos, la vida residual depende esencialmente del tipo y del material básico de cada puente, de su edad y estado y, sobre todo, de las posibilidades de reparaciones y mejoras que pueden prolongar su vida de servicio.

Por lo tanto, sería muy útil reunir en cada país inventarios de los puentes existentes clasificados por tipos y fechas de construcción. También sería deseable continuar las encuestas sobre tasas anuales de sustitución de puentes, indicando las razones de cada sustitución y, hasta donde sea posible, buscar información sobre este asunto en el pasado.

Con la ayuda de diversos sistemas de documentación y utilizando fichas, registros, bancos de datos, catálogos de defectos, que permiten analizar el comportamiento de los distintos tipos de puentes, sería posible preparar en forma más precisa los programas globales de sustituciones en los años venideros.

Sin embargo, la decisión debe tomarse en cada caso particular ya sea para prolongar la vida resi-

dual del puente o para demolerlo y sustituirlo. Esta decisión debe tener en cuenta el estado actual de la estructura y su evolución previsible así como sus cualidades funcionales y las mejoras que sean necesarias por exigencias del tráfico.

La elección es a veces difícil porque, a pesar de las nuevas técnicas desarrolladas en los últimos años, quedan dudas sobre la valoración de los puentes existentes.

Sería deseable mejorar:

- las técnicas de inspección e investigación con el fin de encontrar métodos no-destructivos rápidos y económicos, que permitan comprobar el estado interno de los cables de puentes colgantes y de los tendones de los puentes de hormigón pretensado y el buen estado de las cimentaciones;
- las normas de proyecto que se aplican a los puentes existentes, las cuales necesitan especificaciones especiales;
- las técnicas de reparación, refuerzo y ensanchamiento.

Generalmente es más económico reparar y modificar el puente que sustituirlo, y, a todas luces, los fondos disponibles no son suficientes para demoler y volver a construir todos los puentes defectuosos. Cuando las condiciones estructurales o funcionales son demasiado malas, su reconstrucción es ineludible. No obstante, en muchos casos hay que hacer un balance entre las consideraciones de seguridad y económicas. Algunas veces, cuando el puente se mantiene en servicio, se deben tomar medidas de seguridad tales como limitaciones del tráfico y mayor vigilancia.

De esta política se deduce que es deseable prolongar lo más posible la expectación de vida de los nuevos puentes por diferentes medios: prestar atención a los aspectos de durabilidad y eventualmente sobredimensionar ciertos elementos; dotarlos de dispositivos de protección especialmente para drenaje e impermeabilización; facilitar el acceso para inspección, conservación y posible reforzamiento de la estructura en caso necesario.

Es mucho más económico hacerlo así, porque estas precauciones en el proyecto pueden evitar costosas reparaciones en el futuro y aplaza considerablemente la sustitución del puente sin incremento apreciable de los costes iniciales. En este tema, prevenir es ciertamente mejor que curar.

Tanto para los nuevos puentes como para los existentes, es de la máxima importancia que toda la información de datos importantes tales como registros de construcción, inspecciones, reparaciones y modificaciones, planos de obra, cálculos,

etcétera, se una, archive y actualice continuamente.

En cada caso, la vida residual depende obviamente de la calidad de inspección, conservación y reparaciones y de los futuros cambios de tráfico y medio ambiente del puente; también depende de las decisiones cuyos efectos la alargarán o acortarán.

Estas decisiones implican una amplia gama de conocimientos técnicos y un buen criterio de ingeniería; necesitan de mucha experiencia complementada con el consejo de especialistas de los laboratorios y de las oficinas de proyectos.

Este es un problema muy difícil que merece estudios e investigaciones en diversos campos para llenar algunas lagunas serias en nuestro conocimiento actual y para lo cual es muy deseable una activa cooperación internacional.

BIBLIOGRAFIA

O.C.D.E., Road Research. Bridge Inspection. Informe preparado por un Grupo de Investigación de Carreteras de la O.C.D.E. París, O.C.D.E., 1976.

ASSOCIATION FRANCAISE DES PONTS ET CHARPENTES. Jornadas de la A.T.P.C. Tema III «Ponts — Conception et Durabilité». París, Junio 1978.

GRATTESAT Guy. «CONCEPTION DES PONTS». Curso de la Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Ediciones Eyrolles. París, 1978.

O.C.D.E., Road Research. Evaluation of Load Carrying Capacity of Existing Road Bridges. Informe preparado por un Grupo de Investigación de Carreteras de la O.C.D.E. París, O.C.D.E., 1979.

O.C.D.E., Road Research. Bridge Maintenance. Informe preparado por un Grupo de Investigación de Carreteras de la O.C.D.E. París, O.C.D.E., 1981.

Conferencia Internacional sobre «Gestion des Ouvrages d'Art» (inspección, conservación y reparación de puentes de carretera y ferrocarril). Bruselas-París, Abril 1981. Ediciones Anciens E.N.P.C. París.

* * *

publicaciones del I.E.T.c.c.

historia del puente en España

puentes romanos

Carlos Fernández Casado
Prof. Dr. Ing. de Caminos,
Canales y Puertos

Se han reunido en esta publicación doce artículos que fueron apareciendo durante 25 años en la Revista «Informes de la Construcción», a partir del mes de marzo de 1955. El propósito era mucho más ambicioso pues se trataba de hacer una «Historia del puente en España», pero hasta el momento actual sólo se ha revisado la época romana, si bien el autor tiene la intención de prolongar la historia hasta cuando sus años de vida le den lugar.

Unos apéndices añadidos a los doce artículos originales informan sobre las variaciones experimentadas por algunos puentes más importantes como la del traslado de las ruinas mejor conservadas del puente de Alconétar, que corrió el peligro de quedar sumergido en el embalse de Alcántara, y la reparación de la cimentación de una de las pilas centrales del puente de este mismo nombre que fue detectada, al quedar durante unos días cortado el curso del Tajo, para realizar el montaje de los desagües de fondo correspondientes a la presa del citado embalse.

Un volumen encuadernado en chuché, a dos colores, de 21 x 27,5 cm, compuesto de 554 páginas, 105 grabados, 14 dibujos, 753 fotos blanco y negro, 24 fotos color y 110 dibujos de línea.

Madrid, 1981.

Precios: España, 3.000 ptas.; extranjero, 43 \$ USA.

código-modelo ceb-fip para las estructuras de hormigón

El Instituto Eduardo Torroja, miembro activo tanto del Comité Eurointernacional del Hormigón (CEB), como de la Federación Internacional del Pretensado (FIP), ha tomado a su cargo la traducción y edición de esta importante normativa.

Aunque presentado con el título de «Código Modelo CEB/FIP 1978» este documento incorpora los dos primeros volúmenes de este «Sistema Unificado Internacional de Reglamentación Técnica de Ingeniería Civil». El primer volumen de este «Sistema Unificado» es el denominado «Reglas comunes Unificadas para los diferentes tipos de obras y materiales», donde se exponen los criterios y formatos de seguridad a que han de ajustarse los diferentes Códigos (estructuras de hormigón, estructuras metálicas, estructuras mixtas, estructuras de albañilería y estructuras de madera), que han de configurar la totalidad del antedicho sistema.

El segundo volumen es propiamente el Código Modelo para las Estructuras de Hormigón. Fruto de la colaboración de dos asociaciones del prestigio del CEB y la FIP, desde mediados de los 60, incorpora los avances científicos y tecnológicos producidos en los últimos años sin detrimento alguno de la claridad y operatividad que deben presidir un código que pretende ser, ante todo, un auxiliar práctico para los técnicos de la construcción.

El Código sigue en su estructura las reglas más o menos clásicas: una primera parte dedicada a los datos generales para el cálculo (propiedades de los materiales, datos relativos al pretensado, tolerancias); en segundo lugar se presentan las reglas de proyecto estructural (acciones, solicitaciones, estados límites últimos y de utilización, reglas de detalle para el armado); y, por último, ejecución, mantenimiento y control de calidad.

También incluye reglas para estructuras con elementos prefabricados y estructuras de hormigón con áridos ligeros. Los Anejos del Código se refieren a: terminología, proyecto mediante la experimentación, resistencia al fuego, tecnología del hormigón, comportamiento en el tiempo del hormigón y fatiga.

Un volumen encuadernado en cartón, de 21 x 30 cm, compuesto de 340 páginas, Madrid, mayo 1982.

Precios: España 2.500 ptas. Extranjero 36 \$ USA.