

EL VIADUCTO SOBRE EL POLCEVERA EN GÉNOVA

CLAVES SOBRE SU DISEÑO E HIPÓTESIS DE ROTURA

ALEJANDRO CASTILLO LINARES

Vocal de la Demarcación de Andalucía, Ceuta y Melilla del CICC



EL VIADUCTO SOBRE EL POLCEVERA EN GÉNOVA: CLAVES SOBRE SU DISEÑO E HIPÓTESIS DE ROTURA

Alejandro Castillo Linares

Vocal del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Demarcación de Andalucía, Ceuta y Melilla

INTRODUCCIÓN.

Recientemente se ha producido el colapso estructural del Viaducto sobre el Polcevera, en la ciudad italiana de Génova. El suceso ocurrió en torno a las 12.00 horas locales del pasado 14 de agosto, cuando un tramo de unos 200 m del viaducto diseñado por Morandi se derrumbó, sepultando bajo los escombros a varios vehículos.

El Viaducto sobre la Polcevera forma parte de una primera generación de puentes atirantados, inaugurada por el de Strömsund (Suecia) en 1955, caracterizados por poseer un número muy reducido de tirantes, dispuestos generalmente en dos planos. Posteriormente, a partir de 1967, y comenzando con el puente Friedrich Ebert sobre el Rhin en Bonn, se preferirá disponer un mayor número de tirantes, tipología cuyas ventajas explicaremos más tarde.

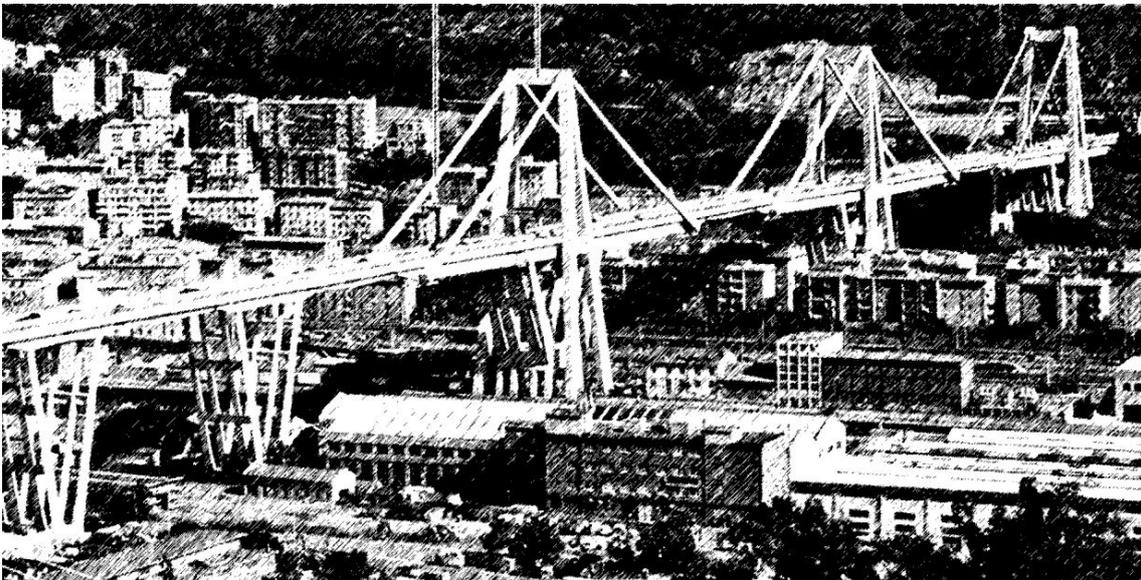


Figura 1: Viaducto de Polcevera antes del colapso



Figura 2: Viaducto de Polcevera tras el colapso

Dentro de esta primera generación de puentes destacan los diseñados por el ingeniero Riccardo Morandi en los años 60, de gran similitud entre todos ellos. En 1962 se inauguró el puente de Maracaibo (Venezuela), de gran longitud, cuyo tramo atirantado comprende 6 torres y 7 vanos continuos, los cinco centrales de 236 m de luz. Cada vano se suspende en dos parejas paralelas de tirantes. El viaducto de la Polcevera, de idéntica tipología, se inauguró en 1966, poseyendo una luz principal de casi 210 m; mientras que el puente Wadi al Kuf fue abierto al tráfico en Libia en 1972, ostentando una luz de 282 m. Morandi también diseñó otros puentes de similar tipología aunque de menores luces, como el puente Ansa de la Magliana (Roma, terminado en 1967) o el puente sobre el río Magdalena en Colombia (1974). Riccardo Morandi diseña los puentes anteriores con un único tirante por pila, como si este tirante sustituyera un apoyo o pila intermedia fija.

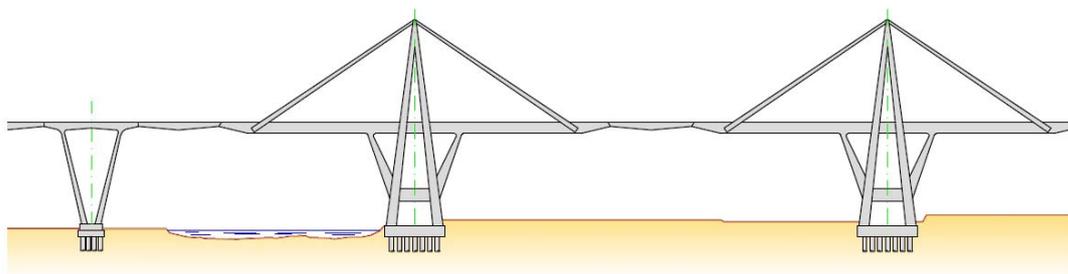


Figura 3: Esquema general de Viaducto de Polcevera

LOS ORÍGENES: EL ACUEDUCTO DE TEMPUL.

El antecedente de estos puentes atirantados de primera generación cabe buscarlo en el Acueducto de Tempul sobre el río Guadalete (Jerez de la Frontera, Cádiz), diseñado por el Ingeniero de Caminos Eduardo Torroja y terminado en 1927. La solución inicial de este acueducto proponía una estructura continua constituida por 14 vanos de cajones de hormigón de 20 m de longitud apoyados sobre pilas; sin embargo la mala calidad del terreno en el cauce del río indujo a Torroja a buscar una solución diferente, consistente en eliminar los dos pilares del cauce sustituyéndolos por un vano del triple de longitud, gracias a unos tirantes de acero.

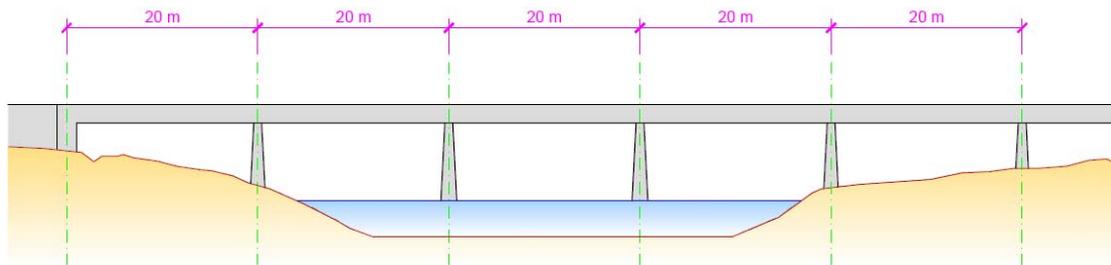


Figura 4: Solución inicial para el acueducto de Tempul

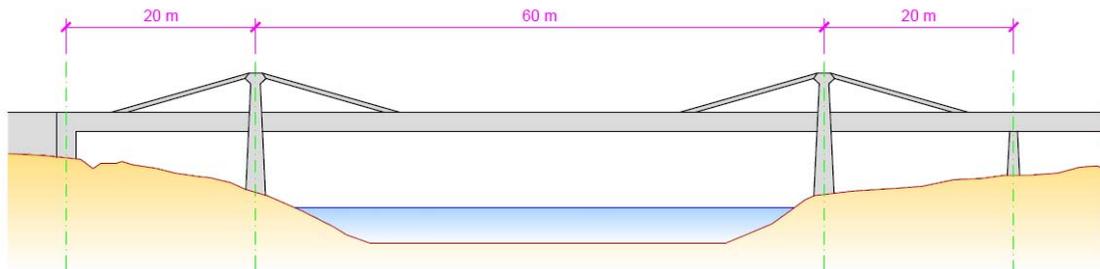


Figura 5: Solución atirantada para el acueducto de Tempul, finalmente construida

El funcionamiento de los tirantes es muy claro: ejercen en su anclaje con el tablero una fuerza cuya componente vertical quiere simular a la de la pila eliminada, equilibrando en parte las flexiones debidas a las cargas gravitatorias del dintel. Además, la componente horizontal del anclaje provoca una favorable precompresión longitudinal en el tablero.

Los tirantes de la obra de Eduardo Torroja estaban formados por 4 cables de acero de 63 mm de diámetro compuestos por 7 cordones de 37 alambres cada uno. Estos tirantes solo se protegían al final del proceso constructivo, recubriéndolos de hormigón, de manera similar a como posteriormente haría Morandi.

Como singularidad adicional, Eduardo Torroja decidió tensar los tirantes, para lo cual hormigonó separadamente la cabeza de los pilonos del resto de la pila con el fin de que pudiera desplazarse verticalmente con libertad. Tras el fraguado del hormigón se levantó la citada cabeza de las pilas con gatos hidráulicos, consiguiendo así la tensión de los cables que hicieron que se despegaran los tramos de la cimbra. Finalmente se hormigonaron los huecos que había entre las pilas y sus cabezas, para rematar la ejecución de la obra hormigonando a

su vez los tirantes ya tensados. Parecen evidentes las similitudes formales y tipológicas existentes entre el acueducto de Tempul y el viaducto sobre el Polcevera de R.Morandi.

EL VIADUCTO PRINCIPAL SOBRE EL POLVECERA EN GÉNOVA

El viaducto denominado “principal” sobre el Polcevera tiene una longitud total de unos 1100 m distribuidos en 11 vanos, donde pueden destacarse dos tipologías fundamentales:

- El sistema no atirantado para los tramos de menor luz: comprendido entre las pilas 1 a 8 se caracteriza, sobre todo, por las pilas en “V” formadas por dos puntales inclinados convergentes hacia tierra sobre el encepado y unidos en cabeza por un tablero de hormigón armado que se extiende en voladizo 7 m a cada lado, adyacentes a la luz central, de 23 m.

Entre estos sistemas de pilas “paratriangulares” se apoyan unos tableros de vigas prefabricadas pretensadas tipo cantiléver de 36 m de longitud, para terminar de materializar los vanos de luz total 70 m.

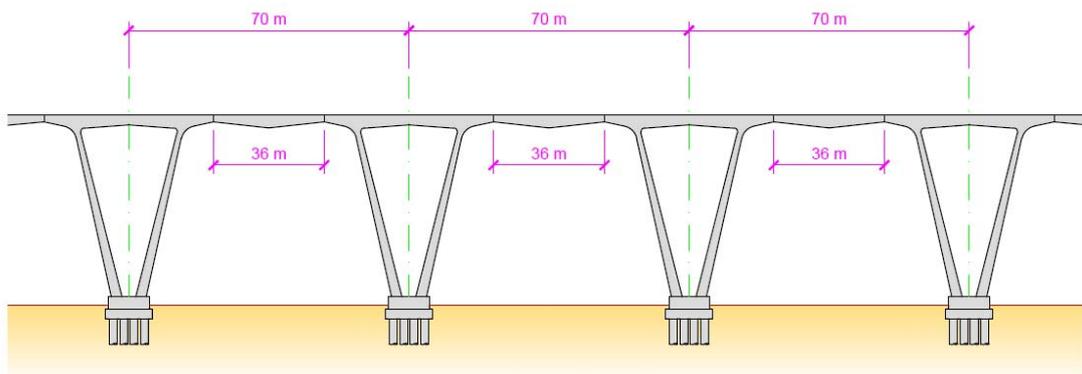


Figura 6: Vanos no atirantados del viaducto sobre el Polcevera

- El sistema atirantado para los tres tramos de mayor luz: situado entre la pila 8 y el estribo. Cada vano, de casi 210 m de luz, consiste en vigas voladas 87 m por ambos lados del eje de las pilas y sostenidas en su extremo por un doble sistema de tirantes de acero pretensado que pasan sobre un caballete posicionado en la cabeza de los mástiles. En los extremos de las vigas voladas se apoyan tramos cantiléver de 36 m de longitud, en forma similar a como ocurre en los vanos más cortos.

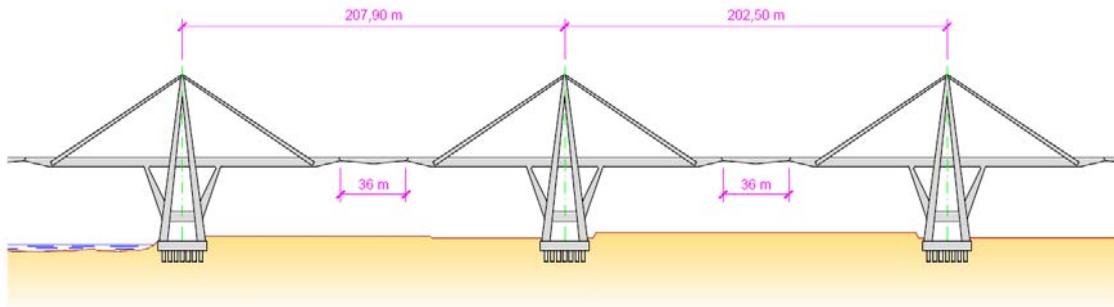


Figura 7: Vanos atirantados del viaducto sobre el Polcevera

La anchura del viaducto es de 18 metros, conteniendo cuatro carriles carreteros. El tablero ejecutado in situ consta de tres vigas cajón de sección variable, unidos a la losa superior y a un conjunto de diafragmas intermedios.

Los cimientos de las torres consisten en encepados de 60 pilotes de 150 cm de diámetro, de longitudes comprendidas entre 25 y 43 m, empotrados en el sustrato rocoso subyacente a los suelos aluviales. Los mástiles atirantados se elevan 90 m desde el nivel del suelo, y poseen unos jabalcones que le dan apoyo adicional al tablero a unos 23 m de distancia del eje de la pila.

Los tirantes se componen de haces de 352 alambres de alto límite elástico y diámetro nominal 0.5". Están conectados al tablero por medio de un diafragma y pasan sobre el mástil sobre una costilla especial formada por elementos metálicos embebidos en el hormigón. Los tirantes se pretensaron con gato hidráulico de manera que para el estado de cargas permanentes el sistema quedara equilibrado, resultando la componente vertical de la fuerza del tirante similar a la de un apoyo rígido ficticio que ocupara su lugar.

Con posterioridad al tesado del tirante se ejecutó alrededor del mismo un recubrimiento de hormigón que, a su vez, se pretensó con 113 alambres adicionales, pretendiendo eliminar la fisuración del recubrimiento y así favorecer la durabilidad del tirante.

El procedimiento constructivo de los vanos principales comenzó con la ejecución, mediante procedimientos convencionales, de los mástiles y del tramo de tablero situado entre los puntales inclinados.

A continuación, y por el procedimiento de avance en voladizo, se construyó el resto del tablero hasta alcanzar, de forma compensada por ambos lados de la pila el punto teórico de conexión con el tirante y apoyo del tramo isostático cantiléver. Para ello se utilizó un pretensado exterior superior provisional, eliminado posteriormente cuando los tirantes entraron en acción.

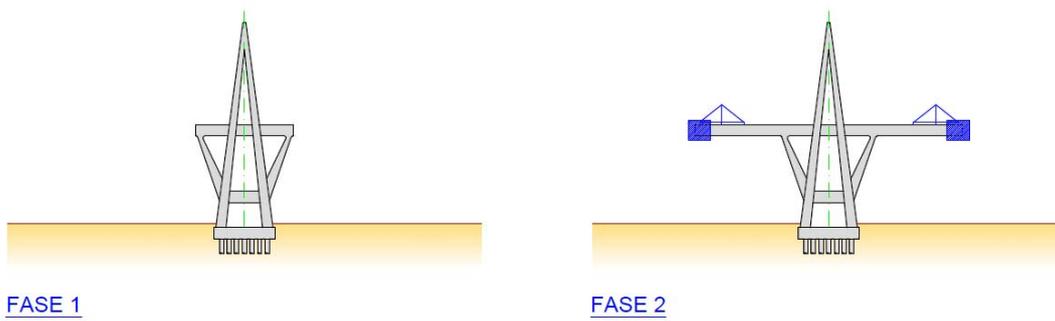


Figura 8: Fases 1 y 2 de la construcción de los vanos atirantados

Posteriormente se instalaron los tirantes de acero, pretensándolos mediante gatos hidráulicos. La construcción del recubrimiento de hormigón de los tirantes se realizó mediante encofrados rectangulares en puestas de 3 m de longitud, y su pretensado con alambres adicionales.

El tramo cantiléver central formado por vigas doble T prefabricadas pretensadas se ejecutó mediante lanzamiento de las vigas, una vez terminadas las operaciones anteriormente descritas.

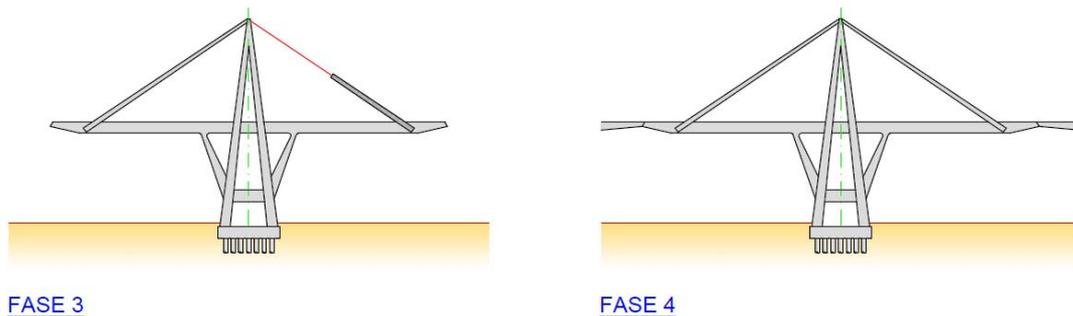


Figura 9: Fases 3 y 6 de la construcción de los vanos atirantados

EL DISEÑO DEL ATIRANTAMIENTO

Se comentó ya que en los atirantados de primera generación el número de tirantes dispuestos es muy inferior a lo diseñado en la actualidad, estando la idea del tirante ligada a la sustitución de un apoyo o pila intermedia fija, en contraposición a las tendencias presentes que al aumentar el número de tirantes consideran éstos como una familia de apoyos elásticos virtuales de menor rigidez, a manera de fundación elástica; como si el tablero estuviera apoyado en un gran número de resortes elásticos de poca rigidez.

La disposición de un número reducido de tirantes derivaba en un canto importante para lo que son puentes atirantados (relaciones c/L del orden de $1/50$ en el caso del viaducto de Polcevera), lo que a su vez implicaba un fuerte peso propio a soportar. El incremento en el

número de tirantes ocasionará un espectacular aumento de la esbeltez de los tableros, con relaciones c/L tan imponentes como $1/200$ o incluso más extremas.

Pero además, la instalación de un mayor número de tirantes (por supuesto individualmente menos potentes en razón a su mayor cantidad) presenta, además de la estética, dos ventajas adicionales decisivas, como son:

- La consecución de grandes luces mediante el procedimiento constructivo de avance en voladizo acompasadamente con el atirantamiento de los vanos. Así, el máximo voladizo pasa a ser la distancia entre el último tirante instalado y el extremo donde va a ir el próximo tirante aún no colocado. Lo anterior condiciona separaciones habituales entre tirantes de 5 a 20 m.
- Debido al mayor número de tirantes existente, la eventual rotura de alguno de ellos deje de ser decisiva. De hecho, los puentes se calculan para que los tirantes puedan ser reemplazables, por lo que las hipótesis de diseño ya incluyen la posible ausencia de uno o más tirantes.

EL COLAPSO DEL VIADUCTO

En relación a la causa de la rotura del viaducto, estableceremos a continuación unas conjeturas iniciales, basadas tanto en la información que se conoce hasta la fecha como en la naturaleza de la propia tipología de la estructura y su modo de funcionamiento. Evidentemente, lo que se expone en las siguientes líneas es una presunción, que se verá refrendada o desechada en función de los resultados de la investigación oficial que actualmente se está cursando.

El viaducto sobre el Polcevera es una estructura compuesta por elementos tanto de hormigón simplemente armado como de hormigón pretensado; estos últimos se corresponden con los vanos cantiléver prefabricados de centro de luz y con los tirantes. Ya se dijo que los alambres de acero de los tirantes están recubiertos a posteriori con un hormigón que posteriormente se pretensó para favorecer la durabilidad del conjunto. Resulta entonces que la única protección contra la corrosión de los aceros que presenta el viaducto es la que le proporciona el propio hormigón.

La durabilidad del hormigón es el resultado natural de la doble acción protectora que el hormigón ejerce sobre el acero: por una parte, el recubrimiento supone una barrera física; por otra, la elevada alcalinidad del hormigón, con un pH cercano a 12, desarrolla sobre el acero una capa pasivante que lo mantiene, en principio, inalterado por un tiempo indefinido. De hecho, las armaduras se hallan protegidas frente a la oxidación cuando el pH del medio que las envuelve está por encima de 9.

Sin embargo, y pese a su apariencia densa y pétreo el hormigón es un material poroso que contiene una red de capilares que, junto con las burbujas de aire ocluido, constituyen un

camino de entrada a los agentes exteriores. El transporte de agua viene determinado por el tamaño y distribución de los poros, además de por las fisuras. Asimismo, la penetración de los gases ácidos como el CO₂ o el SO₂, o la irrupción de cloruros procedentes de ambientes marinos pueden acabar acelerando los procesos de corrosión de las armaduras activas o pasivas. En efecto, con el paso del tiempo, el CO₂ contenido en la atmósfera reacciona con la cal del hormigón para formar carbonato cálcico (o caliza) y agua, creándose así un “frente de carbonatación” que avanza desde el exterior hacia el interior del hormigón, a un ritmo aproximado de entre 10 y 15 mm cada 20 años. El carbonato cálcico, desafortunadamente, tiene un pH inferior a 9, de modo que cuando el frente de carbonatación llega a las armaduras éstas comienzan a oxidarse; mucho más cuanto mayor sea la humedad existente y en presencia de iones cloro. Es sabido, además, que el óxido de hierro tiene un volumen 2,5 veces superior al del hierro que componía inicialmente las armaduras, lo que produce a continuación que el hormigón se fisure, se fracture y se desprenda. La rotura del hormigón, además de la pérdida de sección resistente, facilita la continuación del proceso de oxidación y por tanto de la degradación.

La durabilidad de la protección contra la corrosión del acero se define como su vida útil de diseño, entendiendo como tal el tiempo en el que la citada protección se “consume” (o pierde su eficacia) y no puede ser renovada durante las fases de mantenimiento habituales.

En el presente, para los sistemas de protección de tirantes corrientemente utilizados, se considera que los tirantes puedan tener una vida útil de 50 años, mantenida mediante inspecciones periódicas cada 5 años. Ni que decir tiene que los sistemas de protección actuales están mucho más evolucionados y son evidentemente mejores que el utilizado por R.Morandi: la tecnología, en constante avance, ha evolucionado hacia sistemas multi-barrera de protección, que incluyen galvanización de cordones, fundas individuales de polietileno rellenas de grasa/cera para cada cordón y vainas globales muchas veces inyectadas de cera.

La durabilidad adoptada en general (salvando la excepción de los tirantes) para las estructuras de hormigón armado y pretensado es de 100 años. Pero esta durabilidad solo se consigue aplicando unas técnicas y conocimientos sobre el hormigón que no estaban al alcance de los ingenieros en los años sesenta; y que solo en los últimos años se han plasmado adecuadamente en los códigos y normativa internacional.

Puede entenderse entonces que los tirantes diseñados por Morandi, ejecutados hace más de 50 años, pudieran haber sufrido procesos de corrosión que, hipotéticamente, habrían derivado en una falla de los mismos. A diferencia de las estructuras metálicas, los puentes de hormigón son sufridores silentes de los procesos de oxidación, puesto que esta última solo se hace visible cuando está ya muy avanzada, dado que el propio hormigón enmascara su desarrollo.

La rotura de uno solo de los tirantes es capaz de provocar, sin duda, un colapso global del viaducto. En efecto, es tan enorme el orden de magnitud de la reacción estabilizadora que proporciona la fuerza del tirante que su desaparición aumentaría casi en cinco veces los esfuerzos en el tablero, aparte de que el pilono sería incapaz de resistir el desequilibrio de fuerzas horizontales derivado de la ausencia del tirante. Los efectos dinámicos de la rotura generarían además un efecto negativo multiplicador. Irremediablemente la pila y tableros directamente asociados al supuesto tirante fallido se desplomarían.

¿Debemos por lo tanto tomar aprensión a los puentes atirantados? En absoluto. Ya se ha explicado que el gran número de tirantes que se instalan de acuerdo a los diseños actuales de

este tipo de estructuras diluye enormemente las consecuencias de la rotura de un número limitado de ellos. Además, los modernos sistemas de protección aplicados, técnicas de vigilancia, mantenimiento, y sustitución programada de los tirantes disminuyen hasta términos despreciables las probabilidades de colapso.

Para los puentes de primera generación, con tirantes hormigonados, queda la tarea de extremar la atención y conservación. Actualmente los procesos de carbonatación y oxidación en los hormigones pueden ralentizarse o incluso revertirse mediante la aplicación de modernos inhibidores de la reacción electro-química de muy baja viscosidad (y por lo tanto alto poder penetrante en el hormigón) o con productos realcalinizadores que aumenten el pH de los hormigones que envuelvan los aceros.

El desgraciado colapso del Viaducto sobre el Polcevera debe quedar como un aviso para navegantes; como un estímulo a perfeccionarnos en el mantenimiento de nuestras grandes infraestructuras, y como un recordatorio de que la ingeniería es, a fin y al cabo, una cosa muy seria.

Bibliografía consultada:

- Aguiló, Miguel. "Forma y tipo en el arte de construir puentes". Arada Editorial. Madrid, 2008.
- Manterola, Javier. "Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, Junio 2006.
- Morandi, Riccardo. "Viaducto sobre el Polcevera, en Génova-Italia." Morandi. Informes de la Construcción Vol. 21, nº200. Mayo 1968.
- Torroja, Eduardo. "Acueducto-sifón sobre el río Guadalete". Revista de Obras Públicas, núm. 2477. Mayo 1927.
- ACHE Monografía 26. "Sistemas de reparación y protección de estructuras de hormigón con corrosión". Madrid, 2015.