



Alerta para el mantenimiento de puentes:  
**Hipótesis sobre las causas concurrentes  
que ocasionaron la caída del puente Morandi**

por Ing. Manuel Luque Casanave (\*)

(\*) Consultor Internacional / Profesor-Investigador en la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

### Introducción

La caída del puente Morandi en Génova, Italia ocurrida el 14 de agosto de 2018, es motivo para hacer un análisis técnico de las causas de su caída, que pueda aportar soluciones en medidas de prevención a ejecutar en otros puentes del mundo, para evitar accidentes con muertes. Hago pública esta hipótesis como un aporte a la investigación que está realizando al respecto el gobierno italiano, me baso en investigaciones que he realizado y en experiencias trabajando en consultorías multidisciplinarias de ingeniería para la evaluación y propuestas de solución en problemas de corrosión en estructuras metálicas de plataformas petroleras offshore, torres de destilación y hornos de refinerías de petróleo, así como en puentes y estructuras de muelles portuarios.



**Figura 1. Puente Morandi (Génova) antes del accidente**

Se han observado las características constructivas de las losas, columnas y tirantes de concreto pretensado, la ubicación geográfica (frente al mar), revisado las acciones de mantenimiento realizadas (p.ej. en el puente Morandi se llevaron a cabo obras de reestructuración en el 2016), los videos de la caída, fotografías en las que se observa la condición de las estructuras colapsadas (fierros doblados y retorcidos, grietas y estado del

concreto), las condiciones climáticas del día de la caída (alta humedad, copiosa lluvia, dirección de viento sur a velocidad moderada), cimentación profunda -sobre terrenos aluvionales degradados- para encontrar soporte sobre estratos rocosos y carga en el vano al momento de la caída (constituida por el peso propio del puente con la masa de más de 30 vehículos que cayeron al vacío, con tráfico cuádruplicado respecto al estimado en el proyecto inicial. Asimismo se han tenido en cuenta las recomendaciones que hizo hace unas décadas el Ing. Morandi y las del responsable de la investigación de la caída. Con el análisis de dicha información se ha planteado la hipótesis sobre las causas de la caída, concluyendo que fue consecuencia de una serie de lamentables factores concurrentes.



**Figura 2. Puente Morandi (Génova) después del accidente**

### **Hipótesis**

Factores gravitantes han sido la corrosión salina con formación celdas de concentración tanto en la superficie del concreto como en al interior de las grietas del concreto, presentándose un diferencial de concentración de oxígeno  $O_2$  entre la parte del fierro estructural con niebla salina condensada sobre él (con alta concentración de  $O_2$ ) y la parte del fierro estructural sin condensación de niebla salina (con menor concentración de  $O_2$ ), configurando así una celda de oxígeno, produciéndose un efecto de pila galvánica, con migración de electrones causantes de la corrosión, que se produjo en el área de menor concentración de oxígeno (anódica).

Las grietas en el concreto han surgido en la estructura del puente por fisuras con ruptura del concreto debido a la corrosión y ataque químico, en adición a los mayores esfuerzos de tracción que los contemplados en el diseño (tráfico de vehículos se ha cuádruplicado respecto al estimado en el diseño original), que debilitaron al puente con fatiga estructural por corrosión y por sobrecarga. Como comentario, se sabe que el concreto trabaja a compresión y el fierro a tracción, por ello la mayoría de los puentes colgantes operan con tirantes de cables de acero, como el puente de Brooklyn en los EE.UU. con más de 100 años de antigüedad.



**Figura 3 Estructura del puente Morandi evidencia una agresiva corrosión por la niebla salina y por ataque químico**

La celda de corrosión en el concreto ante la presencia de humedad con precipitación de gases ácidos del ambiente -traídos por el viento de industrias metalúrgicas cercanas- actúan como electrolito, conduciendo la corriente eléctrica por medio del flujo de iones, produciendo un ataque químico en las superficies de concreto, lo que originó pequeñas picaduras que se convirtieron en fisuras y luego en grietas, generando concentraciones de tensiones con un fierro expuesto a los condensados ácidos, que sumaron al efecto corrosivo de las celdas de  $O_2$  al concreto y al fierro, ante un escenario con cimientos debilitados por la sobrecarga, ocasionando una fatiga mecánica progresiva que debilitó la estructura de los tirantes y de las losas de la pista de concreto pretensado.

Un factor crítico concurrente fue el temporal con presencia de vientos que generaron oscilaciones de pequeña amplitud y baja frecuencia, lamentablemente en un momento coincidente con la frecuencia natural de oscilación del vano de la estructura del puente, entrando con ello esa parte de la estructura en resonancia, causando la caída del puente, el que estaba ya debilitado por la corrosión salina y ácida de la estructura y por la cimentación sobrecargada por carga excesiva en el vano que se cayó (más de 30 unidades cayeron entre automóviles y camiones).



**Figura 4. Colapso de la estructura del puente Morandi**

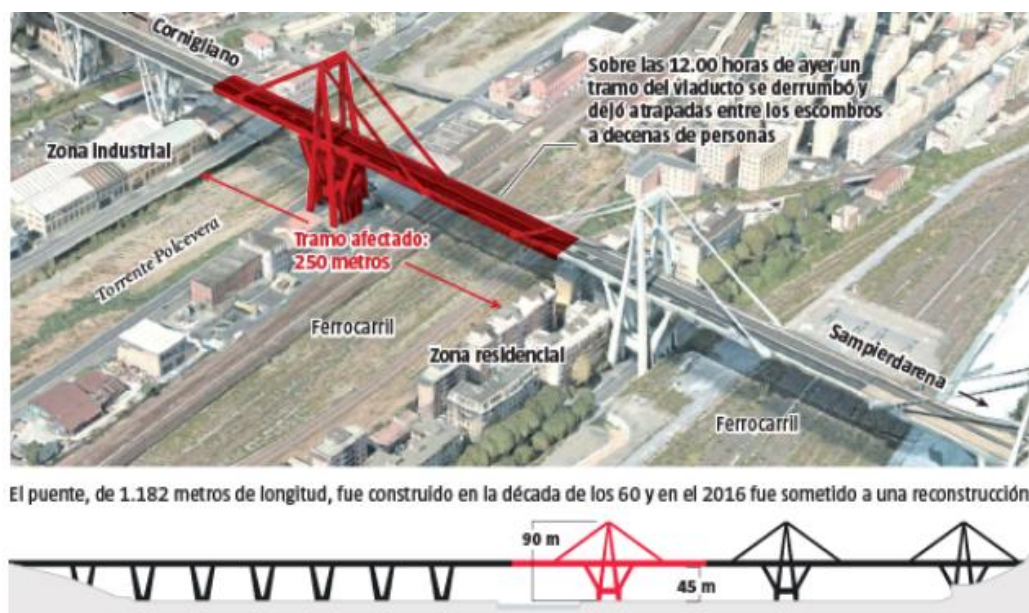
La oscilación forzada sobre el puente fue causada por el viento que vino horizontalmente de izquierda a derecha y al impactar sobre el puente Morandi topa con el panel izquierdo del puente, se desdobra en dos flujos de aire, que recorren el puente. Al no tener un perfil aerodinámico, el aire formó remolinos en la parte superior, y también en la inferior (vórtices de Von Karman). Un vórtice que abandona el puente por la parte superior, crea una fuerza de arriba abajo; cuando lo hace por la parte inferior, la fuerza tiene sentido opuesto; como ambos vórtices se formaron en instantes diferentes, la combinación de ambos es una fuerza periódica alternada que origina la oscilación con torsión del vano. La frecuencia de esta fuerza es llamada frecuencia de Strouhal, si esta frecuencia coincide con la frecuencia natural de oscilación del vano del puente, o más bien con una de las frecuencias naturales del puente (un objeto complejo tiene más de una), ocurre la resonancia y consecuente caída.



**Figura 5. Corrosión y ataque químico en estructuras, oscilaciones por viento con caída por frecuencia resonante**

La frecuencia de oscilación ocasionada por el viento era en el momento de la caída de poca amplitud y de baja frecuencia, dado que la frecuencia de oscilación forzada es menor cuanto mayor es la masa en movimiento -según la teoría del movimiento armónico simple-, y en el momento de la caída el puente tenía mucha masa conjunta, con vehículos más de 30 vehículos circulando en el vano del puente, incluyendo camiones pesados, por lo que el viento ocasionó amplitudes y frecuencias de oscilación bajas. Si hubieran habido menos vehículos transitando (menos masa en movimiento) la frecuencia de oscilación ocasionada por el viento no hubiera coincidido con la frecuencia natural de oscilación del vano y no se hubiera caído el puente.

El Ing. Morandi hace cuatro décadas advirtió que la obra requería un mantenimiento constante para eliminar el óxido, dados los efectos de la corrosión del aire marino y la contaminación en el concreto, recomendando en ese entonces el uso de una resina epóxica para cubrir los refuerzos con materiales de muy alta resistencia química. El funcionario a cargo de la investigación del caso, ha declarado recientemente que según investigaciones preliminares habrían varias causas de la caída, como el envejecimiento de los materiales; el viento con salinidad; además el tráfico se había cuadruplicado en comparación con el estimado cuando se realizó el proyecto y que afectaron los cimientos; la contaminación local. Mencionó que el puente primero se torció y luego se cayó sobre su proyección, pues encontraron piezas de la estructura de fierro que estaban dobladas de un lado. Ambas declaraciones refuerzan conceptualmente mi hipótesis tanto en lo referente a la corrosión salina como en las oscilaciones forzadas del viento que involucraron torsiones de la losa en el vano del puente.



**Figura 6. Vista del tramo colapsado en el puente Morandi**

### **Monitoreo y Mantenimiento**

Como recomendaciones para evitar la corrosión galvánica en el concreto se deberían usar polímeros especiales dieléctricos impregnados en los poros del concreto o aplicados como capas sobre el concreto y sobre los fierros estructurales expuestos a ambiente salino y de gases ácidos, para evitar su corrosión al aislarlos del contacto con el oxígeno la humedad o los cloruros, o modificando su potencial electroquímico. Los polímeros son

impermeables, fuertes flexibles, durables y resistentes, están diseñados para aislar superficies de la humedad y prevenir la corrosión galvánica atmosférica tanto en grietas o intersticios del concreto como en el fierro estructural.

Otra opción es la protección catódica del fierro embebido en el concreto, a realizarse durante el mantenimiento de las estructuras existentes. Se pueden aplicar dos tipos de protección catódica, la de corriente impresa y la de ánodos de sacrificio, esta última con resultados más favorables en reparaciones realizadas a las estructuras de concreto.

Para el monitoreo de la corrosión se utilizan corrosómetros y dispositivos on-line en contacto con el concreto a través de la tecnología de "mirar hacia adentro" en las estructuras de concreto para controlar la corrosión del fierro estructural al interior de la masa de concreto. La técnica funciona mediante ultrasonido, con sistemas en los que las imágenes del interior de las estructuras de concreto se construyen prácticamente en tres dimensiones. Durante finales de los años 80, Ultrasound Cambridge trabajó en la técnica de utilizar el ultrasonido, para examinar las estructuras de concreto, con el objetivo de evaluar sintomatologías de corrosión. Una versión de su tecnología, con licencia de la empresa del Reino Unido Sonatest, ha tratado de generar las imágenes del interior del concreto. Se utilizan un conjunto de hasta seis transductores que emiten ondas de ultrasonido en el concreto desde diferentes ángulos. Los transductores, posteriormente colectan las eco-ondas que regresan desde el interior, y un software elaborado para el fin, ayuda a construir los datos en bruto en una imagen ecográfica 3D del interior de la masa de concreto, detectando así periódicamente el estado de avance de la corrosión de los fierros estructurales para tomar decisiones de mantenimiento.

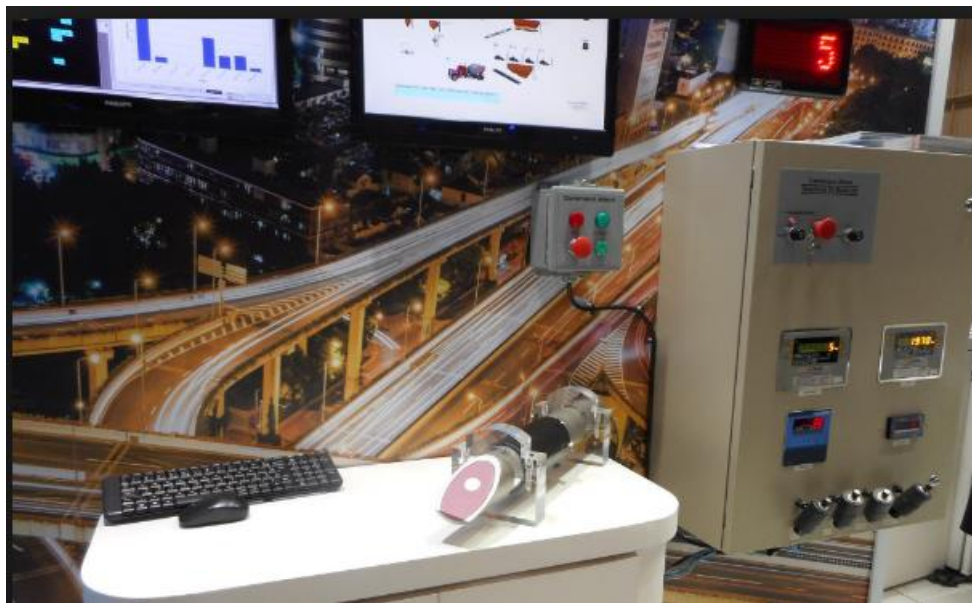


**Figura 7. Monitoreo y mantenimiento periódico de puentes para prevenir accidentes**

Los primeros síntomas de deterioro en el concreto, son las fisuras. La tecnología Sonatest podría estimar defectos en la masa de concreto, evaluando los "ruidos" que se generan durante el desarrollo de las mediciones. En estas condiciones, una grieta se podría visualizar como un defecto lineal, a medida que se gira la imagen obtenida.

Por otra parte, Ultrasound Cambridge - también basados en la técnica del ultrasonido - ha desarrollado un sistema de sensores que al fijarse a una estructura de concreto armado en varios puntos, podría proporcionar automáticamente información periódica acerca del posible deterioro de la estructura debido a los efectos de la corrosión. Cada uno de los sensores del sistema posee una "red neuronal" dispuesta a compensar los cambios diarios y estacionarios de temperatura que indeseablemente podrían alterar las lecturas, en general, los datos de todas las redes neuronales, se pueden combinar entre sí para dar una probabilidad, asociada a cualquier cambio significativo en la estructura.

Otro equipo de monitoreo remoto permite obtener los "potenciales de corrosión" en los fierros de refuerzo inmersos en concreto reforzado, los cuales se sometieron previamente al ataque de cloruros en un ambiente hostil. El sistema de monitoreo, basado en la norma ASTM C876-91, permite determinar desde 0 a 100% la probabilidad de corrosión sobre las muestras evaluadas. El sistema otorga la facilidad para realizar su instalación en campo, siempre y cuando exista cobertura de red celular, puede operarse de forma remota mediante mensajes de texto para iniciar o detener las mediciones, cuyos resultados son almacenados en un data logger local en tarjetas micro SD, posteriormente se envían mediante el servicio general de paquetes vía radio (GPRS) a un servidor Web, que permite dar accesibilidad a los datos mediante una página Web, en donde se puede observar el resultado del ensayo de forma gráfica. Los datos de potencial de corrosión generan la respuesta de la interface medio de exposición-hormigón, que corresponde a un sistema con 90% de probabilidad de corrosión.



**Figura 8. Monitoreo remoto on-line de la corrosión en puentes**

El Instituto Fraunhofer de Circuitos micro electrónicos y sistemas IMS en Duisburg ha dado con un fiable y rentable método para la detección de óxido de corrosión en una fase más temprana. Un nuevo sensor de transpondedores continuamente puede medir y controlar la profundidad en que los iones han penetrado en el concreto. Esto permite determinar cuándo el próximo trabajo de reparación debe llevarse a cabo. El transpondedor transmite los datos medidos por el dispositivo inalámbrico de lectura y no recibe la energía que necesita para medir la corrosión de una batería, sino la recibe de un

campo magnético. Esto significa que no tiene por qué ser sustituido y puede permanecer dentro de la estructura de hormigón de forma permanente.

### **Recomendaciones**

A la luz de lo ocurrido sugiero realizar un programa de revisión del estado de las estructuras de los puentes de concreto en el mundo cercanos al mar, haciéndoles un monitoreo y mantenimiento frecuente, aplicando recubrimientos de polímeros específicos para aislar las superficies de la corrosión. Se puede hacer uso de tecnologías de avanzada -a costo efectivo- monitoreando los puentes on-line según lo descrito en esta propuesta, tanto del estado de corrosión del concreto como del fierro estructural vía GPRS con una aplicación en el Smartphone.

Algunos de los puentes que deben ser monitoreados son el puente Río-Niteroi en Brazil; el puente atirantado Río Antirio, Golfo de Corinto en Grecia; el puente Rafael Urdaneta en lago de Maracaibo en Venezuela; entre otros. En Perú los puentes a monitorear serían los que están sujetos a corrosión por niebla salina, como los de la Costa Verde, los puentes de la carretera Panamericana Sur y Norte, sujetos además a eventos telúricos que pueden ocasionar agrietamientos.