

El puente de Morandi colapsado en el puerto italiano de Génova: dinámica y causas

P. Villani*,

* Politecnico di Milano - Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Italia
paola.villani@polimi.it

Resumen Ejecutivo

Las conjeturas erróneas formuladas para el colapso del viaducto de Morandi en Génova pueden haber sido formuladas en la búsqueda repentina de un chivo expiatorio o, quizás más dolorosamente, por razones económicas y políticas: pero los datos recogidos, el Estudios realizados, los elementos reportados en mis análisis no prueban el colapso estructural como la causa de la caída del viaducto en Polcévera. El colapso fue trágico y tal vez podría haberse evitado: los gerentes de ruta, con un sistema de advertencia meteorológica de alto nivel y una advertencia de tormenta eléctrica en circunstancias extraordinarias, deberían haberse puesto en marcha, todos los procedimientos de seguridad. El estudio presentado aquí, con fotografías y análisis precisos, explica cómo los impactos del cambio climático con la incapacidad de predecir el riesgo han llevado al colapso del viaducto.



Figura 1 Colapso del viaducto de Morandi en Génova en la fotografía del helicóptero

1. Descripción del estado del puente

El Viaducto de Polcevera ha sido continuamente estudiado y consolidado periódicamente. Desde 1990, el viaducto de Morandi fue dañado por ataques químicos y físicos a materiales [1]. Alrededor de las cubiertas se encontraron síntomas de degradación superficial (hormigón altamente carbonatado, grietas locales). En 1992, una inspección detallada reveló daños caracterizados por soluciones de continuidad localizadas cerca de la torre de suspensión, así como un alto grado de oxidación de los cables internos, muchas hebras cortadas y / o reducciones de sección significativo. Por esta razón, los pilones 9 y 10 han tenido intervenciones de modernización estructural [Nota 1]. También se observaron nudos de torsión en las varillas de unión del pílón No. 9 debido a las diferentes condiciones de tensión entre el hormigón pretensado alrededor de las varillas de unión y la plataforma de hormigón pretensado. [Nota 2]

Es por eso que muchos ingenieros han citado la viscosidad del concreto que ha resultado en un pavimento no horizontal..

Ya a principios de los 80, los que cruzaron el viaducto se vieron obligados a hacer altibajos debido al desplazamiento de las estructuras de la cubierta, problemas no

previstos durante la fase de diseño. La nivelación repetida del pavimento asfáltico ha reducido el pavimento a condiciones semi-horizontales aceptables.

También en 2018, se estaba trabajando para reforzar la cubierta de hormigón pretensado y se hicieron planes para modernizar los tirantes.

La falta de horizontalidad es indicativa de una extensión gradual de los tirantes. Cada lazo está formado por hilos de 352 ½ "de diámetro, mientras que la viga principal está desprovista de refuerzo longitudinal, excepto en los extremos y áreas cerca de los soportes intermedios. [Nota 3]



Figura 2 Desprendimiento de la cubierta de hormigón, carbonatación y oxidación de los refuerzos.

Ya en 1994 [1], dos varillas de unión del pilón 9 presentaron una deformación modal que no se ajustaba a las expectativas.

Las varillas de unión de hormigón pretensado protegen el acero de las hebras contra la corrosión (es probable que el medio marino sea atacado por cloruros). En cuanto a la reparación de tirantes, se realizaron los siguientes ensayos.

- sobre hormigón: ultrasonidos; prueba de extracción moler las zanahorias; encuestas de fuerza; Determinación del espesor de hormigón afectado por carbonatación.
- Sobre acero: pruebas de laboratorio en muestras de barras y cordones.

El viaducto estuvo sujeto a actividades continuas de auditoría y monitoreo, que continuaron incluso después de 1994; Las inspecciones y diagnósticos periódicos permitieron controlar todo el viaducto (tirantes, cajones, losas, vigas, soportes, pilones):

- Revisión de las estancias por reflectometría.
- Investigaciones Diagnósticas sobre Fijaciones de Pilones 9 y 10.
- Caracterización dinámica de sistemas equilibrados 9 y 10.
- Estudios de diagnóstico sobre vigas de paneles exteriores de hormigón pretensado.



Figura 3 Se colocaron redes para evitar pérdidas



Figura 4 [Fuente: Spea Engineering - enero de 2016] Investigaciones de diagnóstico sobre las estancias de las pilas 9 y 10. Los núcleos realizados muestran una oxidación en los hilos, una corrosión y una ruptura de los cables pretensados. La funda protectora se oxida en el interior. Corrosión del lazo interno en el puntal de la pila 10. El núcleo examina solo la armadura secundaria [Nota 3].

- Estudios de diagnóstico sobre vigas de hormigón pretensado. - Mediciones de reflectometría en el dominio del tiempo en barras de pretensado

El estado de conservación de los tirantes de los pilones 9 y 10 fue adecuado; sin embargo, los resultados de las pruebas de OTDR mostraron una tendencia lenta hacia la degradación de los cables que constituyen las varillas de unión (reducción de la superficie total de los cables del 10% al 20%). Se produjeron fugas importantes durante el período 2011-2016, posiblemente como resultado de la inundación del 4 de octubre de 2010. Pero el Viaducto de Morandi no está en la lista de intervenciones urgentes. Consecuencias: desprendimiento de la cubierta de hormigón, carbonatación y oxidación del refuerzo. Se han posado redes para evitar pérdidas materiales.



Figura 5 Los bomberos y muchos ingenieros encontraron inmediatamente signos de explosión

2. Descripción del accidente

El 14 de agosto de 2018, aproximadamente a las 11:36 hora local (09:36 UTC), durante una tormenta torrencial, una sección de 257 metros del Viaducto de Morandi colapsó. Testigos informaron que el puente fue alcanzado por un rayo antes de colapsar. Aún no se ha determinado el número exacto de vehículos involucrados. Ciertamente, 35 autos y 4 camiones han sido declarados caídos del puente. El colapso del viaducto de Morandi no se debe a una falla estructural: los elementos recolectados presentados aquí como en un incidente de evidencia clásico no prueban que el colapso estructural sea la primera causa del colapso del viaducto. Los bomberos y muchos ingenieros encontraron inmediatamente signos de explosión. Las imágenes del 14 de agosto de 2018 fueron muy claras. Los bomberos viajan en una superficie cubierta de grava y pedregal de roca a través del área del viaducto de Polcevera en Cornigliano. También en esta área, los techos de algunos almacenes se derrumbaron bajo el viaducto de Morandi, donde el camión verde estaba atascado. Estos muestran una explosión: las ruinas son completamente diferentes de las encontradas en caso de colapso estructural. Dos colapsos distintos que ocurrieron en minutos. El primer colapso ocurrió en el lado de Cornigliano, un colapso que también dañó los hangares subyacentes.



Figura 6 Los bomberos se mueven sobre una superficie de grava y roca pequeña a través del área del viaducto de Polcevera en Cornigliano

3. Causas

La cámara web de "Autostrade per l'Italia" (el mayor operador de autopistas en Italia) aclara la dinámica del colapso del viaducto de Morandi.

Del video completo [Nota 4], sabemos qué tan rápido fueron los vehículos y, por lo tanto, dónde se encontraban en el momento del desastre.

Un camión cisterna blanco está en tránsito en la sección de la autopista, va directamente al sur. Le sigue un camión verde. En el video a las 00:55, un camión amarillo usa entre 35 y 40 segundos para entrar en la sección del puente que posteriormente colapsó. Como se puede ver en las imágenes de la cámara web, este camión está cerca del pilar 9 después de 50 segundos. El petrolero blanco [Figura 7, Vehículo A] transita a las 2:11 minutos; a las 3:00, está en la carretera y se desplomó. De hecho, a las 2:28, acaba de pasar la curva, y a las 2:36 minutos está exactamente en la posición en la que el camión verde se atascará.



Figura 7 Un petrolero blanco está en tránsito en la sección de la carretera, en dirección sur..



Figura 8 El camión verde en tránsito en la sección de la autopista, en dirección sur.

A las 2:37 minutos, el camión rojo Alba pasa, precedido por el camión de bobina metálica, con un peso total de 44 toneladas: ambos caerán bajo el viaducto de Polcevera.

El tráfico a lo largo de la carretera que colapsó de inmediato es muy lento y avanza a una velocidad inferior a la utilizada en la curva de la primera sección del viaducto.

La explosión es visible a las 3:41.

El camión verde pasa a las 3:10, se cuelga a unos pocos metros de la sección colapsada. Y en la cámara web bajo el pilón 9, ves un brillo repentino [Nota 5] Inmediatamente después de que el puente se mueve y luego se derrumba.



Figura 10 En la cámara web bajo el pilón 9, se ve un resplandor repentino Cámara web bajo el pilón 9: en la parte superior, el reflejo del viaducto en el techo mojado. Esta es una imagen relevante que ayuda a determinar la velocidad a la que colapsa el puente y la procedencia de los escombros.

Esta imagen explica las primeras fases del colapso..

4. Evidencia disponible

Este petrolero blanco es la clave para resolver el colapso del Viaducto de Polcevera. Al observar las imágenes es claramente visible el vehículo remolcador del tanque entre los escombros del puente.



Figura 11. El tractor del tanque entre los escombros del puente..



Figura 12. El tractor del tanque entre los escombros del viaducto y ahora en el área de escombros bajo investigación.

Es un semirremolque con tanque elíptico para combustible o ADR [Nota 6]. El tanque de metal completamente de aluminio, de unos 20 metros de largo en tránsito en un puente durante una tormenta violenta, atrae rayos. Los camiones cisterna están provistos por el sistema de puesta a tierra estática [Nota 7]. La resistencia de conexión descarga a tierra las cargas electrostáticas que pueden crearse al usar los camiones cisterna (para movimiento de fluidos o flujo de líquido dentro de los tubos flexibles de descarga). La ley italiana prohíbe la carga y descarga del petrolero ADR en caso de tormenta. La conexión a tierra es una tira de metal (generalmente de cobre), a menudo visible, desenganchada, arrastrada, que toca el asfalto. La línea de conexión a tierra del camión, tal vez olvidada, trajo el contacto. El "Relámpago de la Nube Negativa a Tierra" probablemente golpeó la torre de la suspensión, probablemente una de las varillas de unión en la parte superior del Pilón 9 y el rayo ascendente "líder a pasos" se generó en términos de descarga positiva y más rápida. E intenso: se ha propagado provocando la explosión del tanque..

Un rayo positivo y ascendente de "líder escalonado" a una velocidad de cien mil kilómetros por hora y determina una descarga eléctrica del orden de 100 kA.

Este flash es invisible debido a la velocidad que lo caracteriza y para esto, no aparece en ninguna de las imágenes de la cámara, pero en la descarga de retorno, determina un breve destello de luz y una detonación. El fuerte estruendo escuchado por todos los testigos. Algunos testigos citaron el estruendo, tal vez un rayo, todos vieron el colapso.

Alguien [Nota 8] declaró que llegó a un lugar protegido, se detuvo y se bajó del vehículo; escuchó una detonación y luego un fuerte movimiento de aire que lo empujó contra una pared.

El 14 de agosto de 2018, hay una alerta meteorológica en Génova: los rayos ocurren en la región. Una tormenta ilumina Génova toda la noche [Nota 9].



Figura 13 Los techos colapsados de algunos almacenes bajo el viaducto de Morandi

Pero nadie imagina, ya que esto nunca ha ocurrido antes, que el tránsito de la autopista debe detenerse para los tanques ADR.

No hay pararrayos en el pilón del Viaducto de Morandi.

La explosión del petrolero provocó que el Viaducto Morandi y una silla Gerber se movieran, lo que provocó el colapso de la cubierta del puente en el lado de Cornigliano.



Figura 14 La posición de la cubierta más allá de la "farola" en la carretera del río Cornigliano [Nota 10]

Aquí vemos el colapso de la plataforma en el suelo con una traducción rota en el eje horizontal. Al mismo tiempo, el bastidor de soporte se colapsó debido a la separación de la silla de montar de Gerber.

Sin apoyo, la parte restante del puente se suspendió por unos momentos en los tirantes de la estaca 9 que luego se derrumbó en ciertos momentos. En el suelo sigue siendo el tractor, habrá sido empujado y dejado caer en la explosión. El tanque está explotado y no podemos encontrarlo.

El tractor está ennegrecido. Un logo en la puerta del vehículo y nada más. Otro camión blanco cercano pero sin rastro del tanque.

Un tanque de veinte metros de largo y que contiene un promedio de 41,000 litros de combustible o ADR ha desaparecido. Los colapsos suelen ser verticales.

Pero en este caso, la explosión provocó una dinámica diferente y, por lo tanto, en la primera sección de la plataforma colapsada, el área afectada es más grande que la que se encuentra exactamente vertical del viaducto. La explosión fue una fatalidad terrible, un relámpago "stepper leader" le interesó al puente justo en ese momento cuando estaba pasando a un camión cisterna cargado con ADR o combustible y una muerte decisiva, que rodó con el sistema de puesta a tierra. En el pavimento mojado.

La posición de la cubierta del puente más allá de la luz de la calle en la carretera en la costa de Cornigliano. Se gira la plataforma del puente: un puente de carretera de 18 metros de ancho que se derrumba en un instante, pero que durante el colapso gira 90 °.

Un evento inusual y extraordinario.

¿Qué fuerza se necesita para rotar y mover objetos de 36 metros de largo, 18 metros de ancho y un peso de 916 toneladas?

5. Conclusión

Esta destrucción fue una muerte terrible y posiblemente evitable: el operador de la autopista no pensó, con una alerta meteorológica naranja y una advertencia de tormenta eléctrica en curso, aplicar todos los procedimientos existentes para cargar y descargar. Las cisternas. Hay mucho trabajo sobre políticas de cambio climático, pero mucho menos sobre la relación entre la seguridad vial y las condiciones climáticas.

El clima está cambiando y necesitamos desarrollar protocolos de seguridad..

[Nota 1]

Retrofit: la disposición de los nuevos cables externos desde el travesañ del puente hasta la parte superior de los pilones. Algunas abrazaderas de cable de acero conectadas al travesañ del puente y la parte superior de la antena se colocaron a lo largo de la plataforma utilizando bloques de anclaje de acero.

[Nota 2]

En 1992, durante un control de 90 metros en la parte superior del pilón 11, en las varillas de unión en el lado de Génova (lado norte), el cemento había dejado una parte del acero expuesta, lo que había provocado la corrosión por disolución. alrededor del 30% de las hebras.

Las acciones en las que trabajaba la varilla de acero (unos 7.000 kg) estaban muy por debajo de la resistencia del acero que la fabricaba (15.000 kg).

[Nota 3]

Descripción del puente.

La zona del sistema equilibrado consta de tres pilotes atirantados (pilotes 9, 10 y 11) interconectados por cables de hormigón armado pretensado. Los tres voladizos atirantados constan de cuatro elementos básicos: antena, puente, puente y varillas de unión.

El viaducto principal tiene los siguientes ejes teóricos:

- Un tramo de 43,00 m.
- cinco tramos de 73,20 m
- un tramo de 75.313 m
- un tramo de 142.655 m
- Un tramo de 207.884 m.
- Un tramo de 20,50 m.
- Un tramo de 65,10 m.

Barras en la pila: distribución de la tracción en el sistema de suspensión consolidado:

Estancias de hormigón pretensado (lado de Génova) (7.560 T (kN)

3 + 3 cables externos secundarios (lado Génova) (7,560 T (kN)

6 + 6 cables externos principales (lado Génova) (17,040 T (kN)

Protectores de hormigón pretensado (lado Savona) (6 420 T (kN)

3 + 3 cables externos secundarios (lado Savona) (6 420 T (kN)

6 + 6 cables externos principales (lado Savona)) (17,040 T (kN)

Los tramos, de una longitud tan diferente, encuentran su enlace conceptual en una serie de puentes de hormigón pretensado, todos en el mismo tramo de 36.00 m, simplemente respaldados por una serie de sistemas especiales, entre los cuales uno Puede distinguir dos tipos básicos diferentes:

- El sistema que soporta los vanos más pequeños consta de dos pilares inclinados conectados a la parte superior por una viga en voladizo doble de longitud variable. El conjunto es de hormigón armado, transportado por una balsa de cimentación que a su vez descansa sobre pilotes perforados de 110 cm de diámetro y una longitud de hasta 40.0 m.
- El sistema que soporta los pentagramas más pequeños consiste en dos pilares inclinados conectados a la parte superior por una consola de doble viga de longitud variable. Todo el concreto reforzado, apoyado por una balsa de cimentación que a su vez descansa sobre pilotes perforados de 110 cm de diámetro y hasta 40.0 m de longitud
- Corbelling equilibrado para vanos principales. Este sistema consiste en una viga continua con tres vanos apoyados en cuatro soportes, con dos brazos en voladizo que soportan las vigas mencionadas anteriormente de 36.00 m. Los dos soportes externos de la viga de tres vanos están provistos por los anclajes de dos protectores pretensados que pasan sobre un mástil (torre de suspensión) ubicado en el eje del sistema.
- La parte superior del mástil está a 90.00 m sobre el suelo y aproximadamente a 45.00 m sobre la cubierta de la calzada.

Cada sistema balanceado incluye:

1. Una balsa de cimentación de hormigón armado que descansa sobre pilotes rígidos de 150 cm de diámetro.
2. Caballete de hormigón armado especial compuesto por cuatro curvaturas en forma de "H" yuxtapuestas y conectadas entre sí por elementos cruzados. La parte superior de los caballetes proporciona soportes elásticos a la viga del puente.
3. Un mástil o torre ("antena") que consta de cuatro patas inclinadas con conexiones adecuadas en ambas direcciones (longitudinal y transversal) para formar un marco verdadero, pero para mantener la torre independiente. del sistema de caballete.

4. Una viga de puente de hormigón pretensado continuo, de tipo celular, con losas superior e inferior y seis nervaduras longitudinales, que descansan sobre el caballete al que se refiere el párrafo 2. La conexión entre la plataforma y los apoyos se realiza mediante una viga transversal rígida. También hormigón pretensado, cuyas proyecciones a cada lado de la cubierta proporcionan el anclaje de los dos cables de soporte que pasan en la parte superior del mástil a 9 000 m de altitud. Finalmente, se envolvieron envolturas de concreto alrededor de los cables; La función de estos cascos, como sabemos, es que, además de proteger el acero, también reduce el alargamiento del cable durante el paso de las cargas en movimiento porque los cascos en sí mismos han sido pretensados.

[Nota 4]

Viaducto de Polcevera: la cámara web de "Autostrade per l'Italia" (el mayor operador de autopistas en Italia) <https://www.youtube.com/watch?v=t4JY3UIdLLU>
<https://www.ilfattoquotidiano.it/2018/09/26/ponte-morandi-nessuna-manomissione-dei-filmati-di-autostrade-la-polizia-diffonde-il-video-integrale-prima-del-crollo/4651206/>
http://www.ilsecoloxix.it/p/multimedia/genova/2018/09/26/ADibKQrB-integrale_autostrade_telecamera.shtml

[Nota 5] http://www.ansa.it/sito/videogallery/italia/2018/08/20/il-momento-del-crollo-ripreso-dalle-telecamere-collocate-sotto-il-ponte_401a0c5a-bb0b-44dc-b80c-8909db8ad8db.html

[Nota 6] Las clases de mercancías peligrosas según el ADR son las siguientes: Clase 1 Sustancias y artículos explosivos, gases de Clase 2, incluidos gases y vapores comprimidos, licuados y disueltos, gases inflamables (por ejemplo, butano, propano) , acetileno) ...

[Nota 7]

El sistema determina si la resistencia de conexión entre el camión cisterna y la tierra verificada es igual o inferior a 10 ohmios. 10 ohmios es el requisito de referencia en varias normas internacionales, la más importante de las cuales es la norma estadounidense NFPA 77 "Práctica recomendada para electricidad estática" y la norma europea Cenelec CLC / TR: 50404

[Nota 8]

Declaración <https://www.youtube.com/watch?v=5FLs-nZQXiw>

[Nota 9] La declaración de ARPA Liguria (Agencia Regional para la Protección del Medio Ambiente) afirma que "actualmente hay una estructura de tormenta importante en el Mar de Liguria acompañada por una intensa actividad eléctrica cuya trayectoria es constante Supervisado por el centro de operaciones ".

[Nota 10] Carretera del río Cornigliano <https://goo.gl/maps/1iSuahc9JrJ2>

Referencias

[1] Gentile C., Martinez y Cabrera F. (1996), Effetti del consolidamento del sistema di sospensione sul comportamento dinamico di un ponte strallato, Studi e Ricerche vol.17, Politecnico di Milano

[2] Camomilla G., Pisani F., Martinez y Cabrera F. (1995), Repair of the stay cables of the Polcevera Viaduct in Genova, Italy

[3] Morandi R. (1979), The long-term behaviour of viaducts subjected to heavy traffic and situated in an aggressive environment: the viaduct on the Polcevera in Genoa
<http://doi.org/10.5169/seals-25613>

[4] Villani P. (2019), Dinamica e cause del crollo del viadotto Morandi a Genova, Sistemi di Logistica

[5] Villani P. (September 11, 2018), Polcevera: dinamica del crollo del viadotto Morandi, Protecta, Roma

[6] Villani P. (2014), Le indagini relative alla responsabilità degli enti proprietari della strada [Investigaciones relacionadas con la responsabilidad del propietario de la carretera.], dans le livre "Indagini e rilievi nei sinistri stradali" [Investigación y encuestas de accidentes viales.], Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna