



CICLO DE SEMINARIOS WEB

Ingeniería Estructural Forense. Casos de Estudio de colapsos y fallos de puentes.

Ing. Martín Polimeni

Prof. Maestría « Construcción y Diseño Estructural » (FIUBA)

Chair IABSE Argentina

eeppsingenieria@gmail.com





INGENIERÍA ESTRUCTURAL FORENSE

CASOS DE ESTUDIO

- ☐ Puente de Plata - Point Pleasant
- ☐ Viaducto Línea 12 Metro CDMX
- ☐ Puente de Chirajara
- ☐ Puentes Nanfangao
- ☐ Puente Sgt. Aubrey Cosens V.C. Mem.
- ☐ Puente Nipigon
- ☐ Puente Martin Olav Sabo
- ☐ Puente I-35W Minneapolis
- ☐ Puente Peatonal FIU - Miami

Las hipótesis y opiniones aquí expresadas son exclusivamente de mi propiedad y responsabilidad.



INGENIERÍA FORENSE

La *Ingeniería Forense* es la aplicación del arte y la ciencia de la Ingeniería en el sistema judicial, que requiere de los **servicios profesionales de ingenieros legalmente calificados**. La *Ingeniería Forense* puede incluir la **investigación de causas físicas de accidentes** y otras fuentes de reclamos y litigios, preparación de informes de ingeniería, testimonios en audiencias y juicios en procedimientos administrativos o judiciales, y la entrega de opiniones consultivas para ayudar a la resolución de disputas que afectan la vida o la propiedad. *Milton F. Lunch, former General Counsel to the National Society of Professional Engineers (NSPE)*



INGENIERO FORENSE

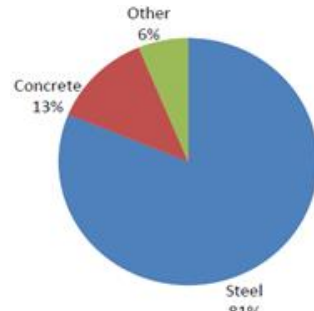
El *Ingeniero Forense* es un **ingeniero profesional** que se ocupa de la **ingeniería asociada a problemas legales**. Actividades asociadas a la ingeniería forense incluyen la **determinación de las causas físicas o técnicas de accidentes o fallas**, preparación de informes y presentación de testimonios o consejos y opiniones que ayudan en la resolución de disputas relacionadas. Al *Ingeniero Forense* también se le puede solicitar que emita una opinión sobre la responsabilidad del accidente o falla. *Carper*

Definición de falla:

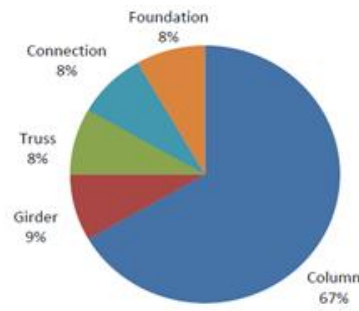
Cuando una instalación, estructura o material no cumple satisfactoriamente la función de la manera prevista y para la que fue creado o ejecutado. No se requiere ni el colapso parcial ni total, ni eventos catastróficos, para considerar que una estructura a fallado.

CAUSAS DE FALLAS Y COLAPSOS

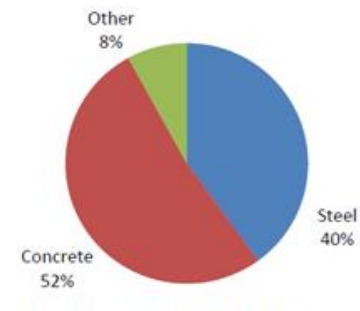
Algunas
estadísticas de
interés



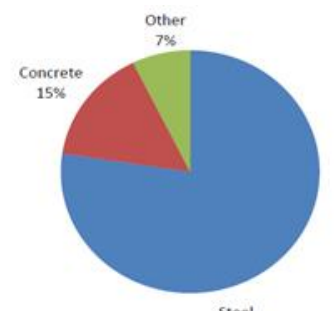
Material Type in the Bridges that Failed due to Material Defect (18 failures)



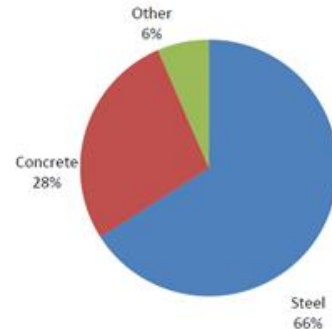
Failure of Structural Elements due to Earthquake



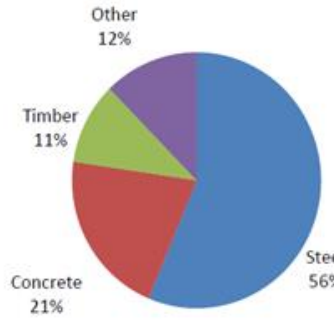
Material Type of the Bridges that Failed due to Deficiency in Construction (38 failures)



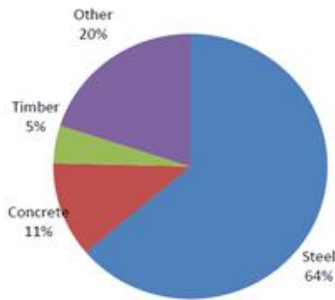
Material Type of the Bridges that Failed due to Collisions (163 failures)



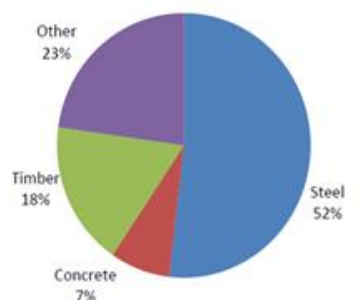
Material Type of the Failed Bridges due to Scour (200 failures)



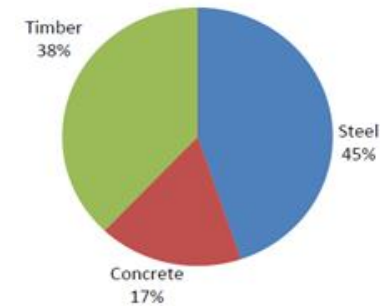
Material Type of the Bridges that Failed due to Floods (301 failures)



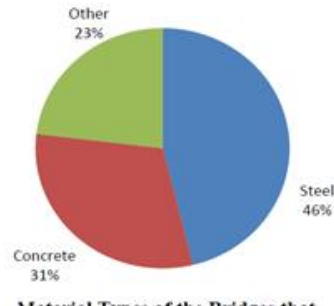
Material Type of Failed Bridges due to Overload (135 Failures)



Material Type of the Failed Bridges due to Environmental Degradation (71)



Material Type of the Failed Bridges due to Fire (30 Failures)



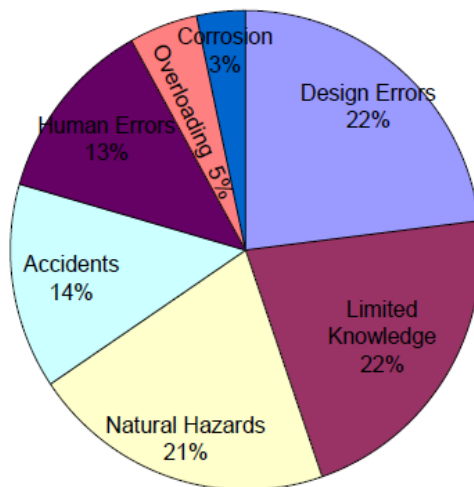
Material Types of the Bridges that Failed due to Extreme Wind (17 Failures)

Number of Bridge Failures due to Internal Causes – Material Used and Facility Type

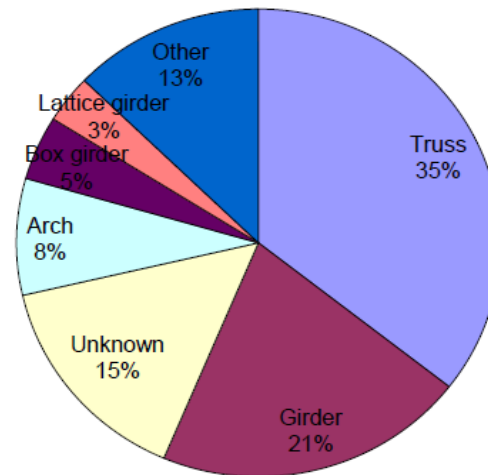
Internal Causes of Bridge Failures	Material Used			Facility Type			
	Steel	Concrete	Other	Roadway	Highway	Pedestrian	Railway
Design Error	13	5	0	13	6	2	1
Lack of Maintenance	1	1	1	2	1	0	0
Deficiency in Construction	10	13	4	24	6	1	0
Material Defect	13	2	1	10	4	0	1
Total	37	21	6	49	17	3	2

CAUSAS DE FALLAS Y COLAPSOS

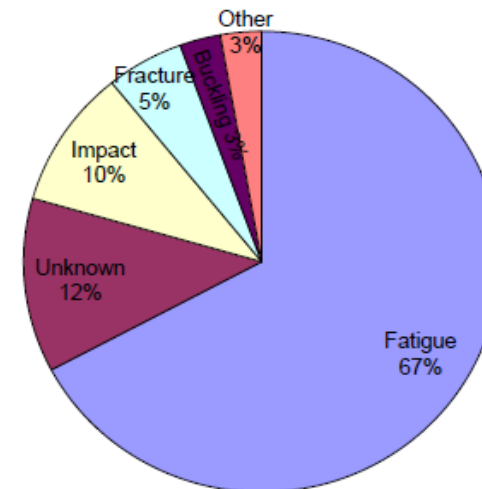
Algunas estadísticas de interés. Puentes de acero



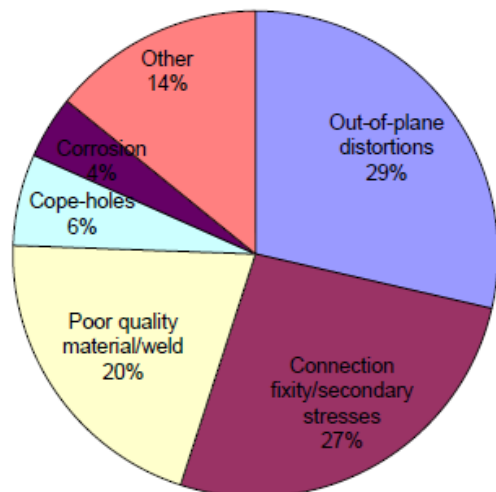
Failure causes leading to collapse of metallic bridges.



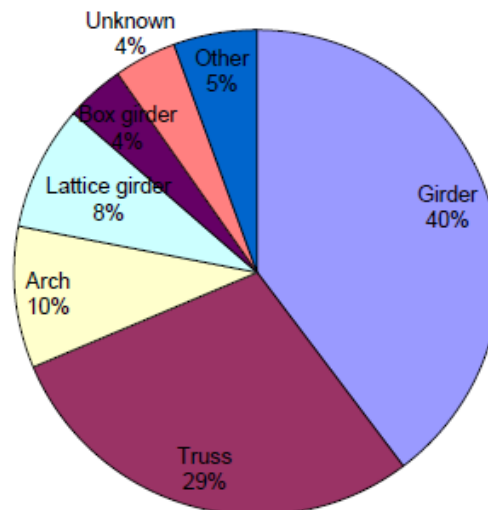
Structural form of collapsed metallic bridges.



Failure modes for non-collapsed metallic bridges.



Nature of fatigue cracking in non-collapsed metallic bridges.



Structural configuration of non-collapsed metallic bridges.

*Fuente: A review of metallic bridge failure statistics
B.M. Imam & M.K. Chryssanthopoulos
Faculty of Engineering and Physical Sciences,
University of Surrey,
Guildford, GU2 7XH, UK*

PUENTE POINT PLEASANT

CASO DE ESTUDIO

El 15 de diciembre de 1967, el Puente de Plata (Silver Bridge / Point Pleasant) en Ohio, USA, colapsó en servicio.



Photograph of St. Mary's bridge similar to the Pt. Pleasant bridge before collapse.

CAUSAS PRINCIPALES

- **Inadecuada** elección de las propiedades **fractomecánicas** (**tenacidad**) del acero.
- **Proceso de corrosión fatiga** de una barra de ojo del sistema de suspensión.
- **Falta de redundancia** estructural.
- Inadecuadas tareas de **inspección y mantenimiento**.



CONSECUENCIAS

- 46 personas muertas.
- Drásticos y cruciales cambios y adaptaciones en los códigos y reglamentos de diseño, construcción e inspección de puentes.

SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

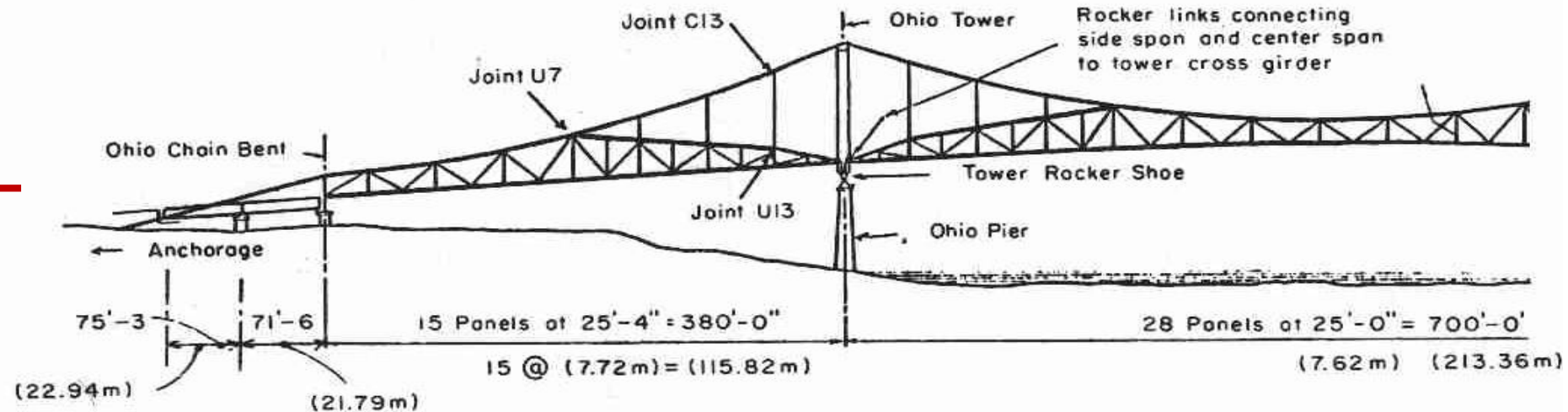


Figure 2.2 Elevation of Point Pleasant Bridge showing location of joints C13, U7, and U13.

Cadenas de suspensión tipo barras de ojo. La cadena formaba parte del cordón superior del reticulado de rigidez longitudinal. Un proceso combinado de **corrosión-fatiga** inició y propagó una fisura en el agujero de alojamiento del perno de la barra 330 en la junta C13. La **falla de dicha unión produjo el colapso total de la estructura.**

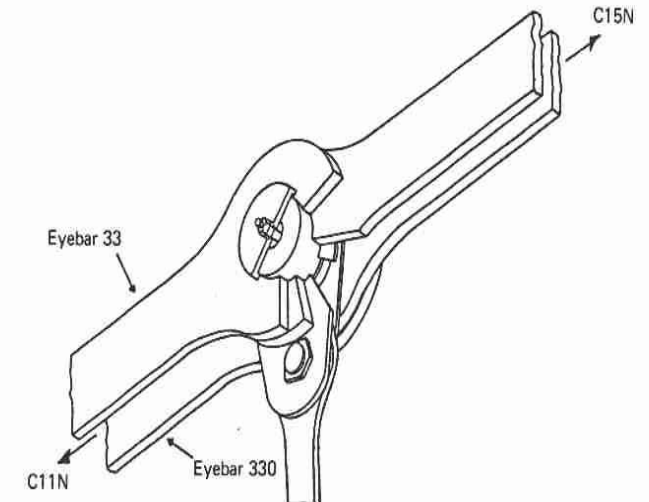


Figure 2.3 Eyebar chain joint at C13 where the chain was connected to truss by hanger and hanger strap plates.

TENACIDAD A FRACTURA DEL ACERO

Acero: **SAE 1060**. Alto contenido de carbono.

Alta resistencia pero **baja tenacidad** a fractura.

Inapropiado para uso estructural.

Longitud de fisura crítica:

$$a_c = (1 / p) * (K_{Ic} / Y S_c)^2 < 20 \text{ mm}$$

Muy pequeña e indetectable.

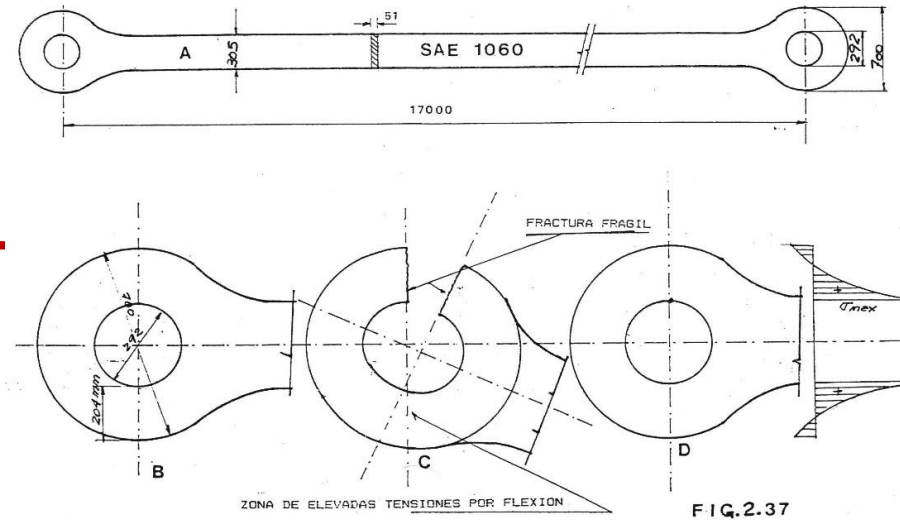


FIG. 2.37

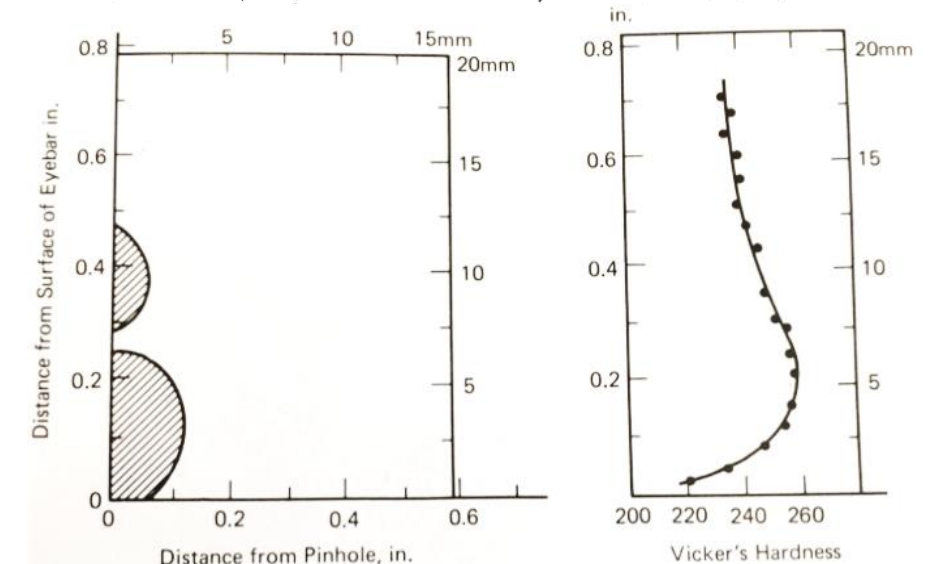
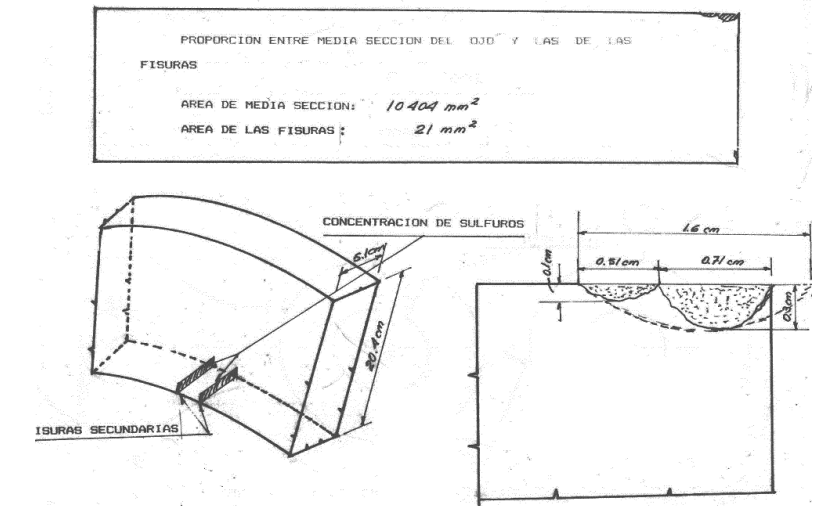


Figure 2.9 Location of initial eyebar cracks and the local hardness of the material.

TENACIDAD A FRACTURA DEL ACERO

Charpy test:

CVN (0°C) < 5 J

Tenacidad a fractura:

KIC (0°C) ~ 44 MPa m^{0.5}

Valores inadmisibles para el uso
estructural.

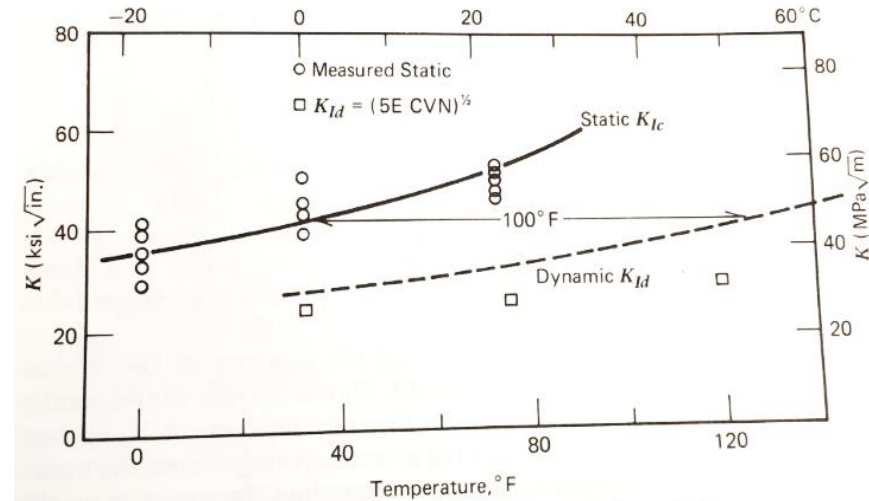


Figure 2.10 Fracture toughness of eyebar steel.

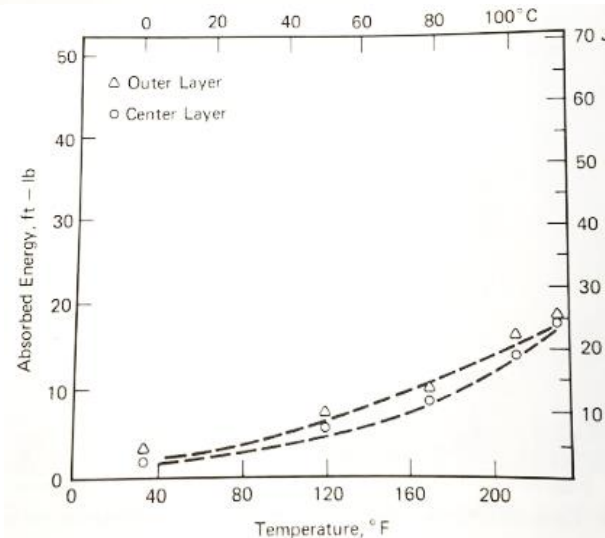


Figure 2.11 Average CVN test data from eyebars.

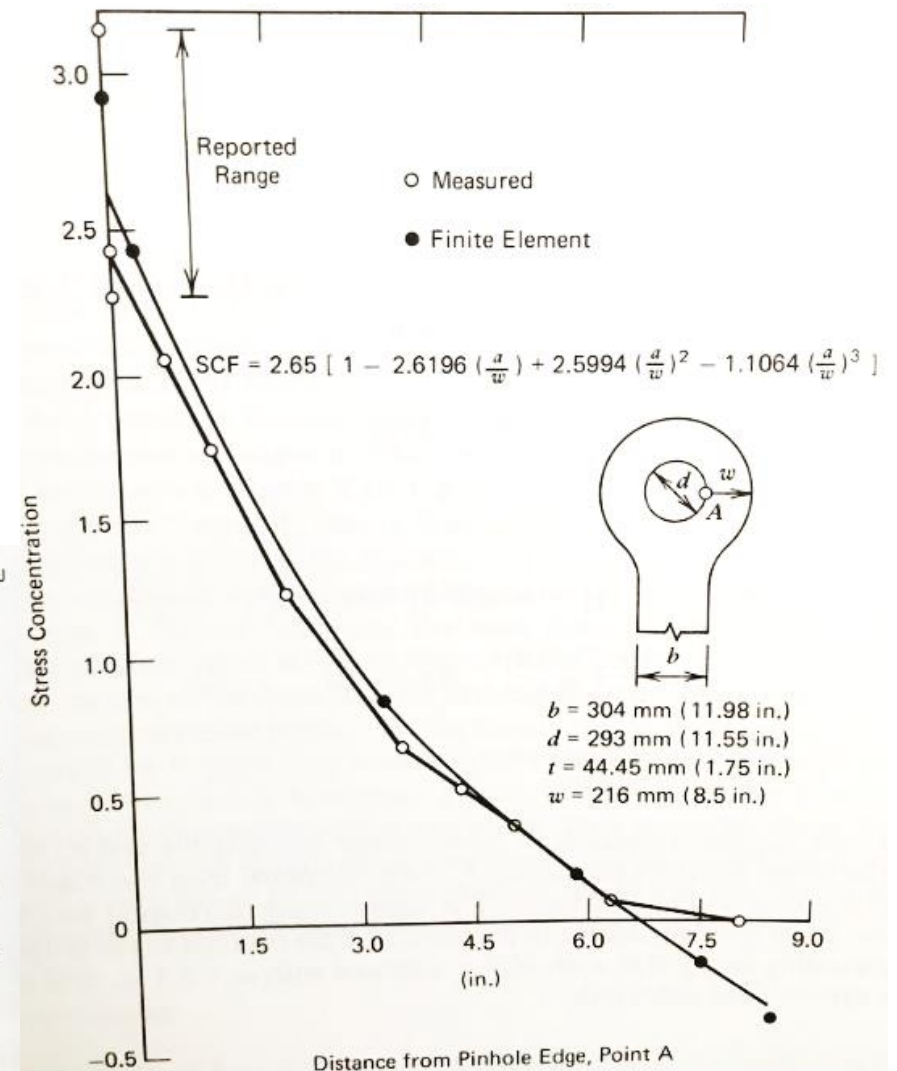


Figure 2.14 Comparison of finite element analysis and measured values.

FRACTURA DE BARRA DE OJO POR CORROSIÓN FATIGA

Fisura crítica menor a 16 mm!!

Este paradigmático colapso modificó para siempre la filosofía y criterios de diseño, construcción, inspección y mantenimiento de puentes de acero.

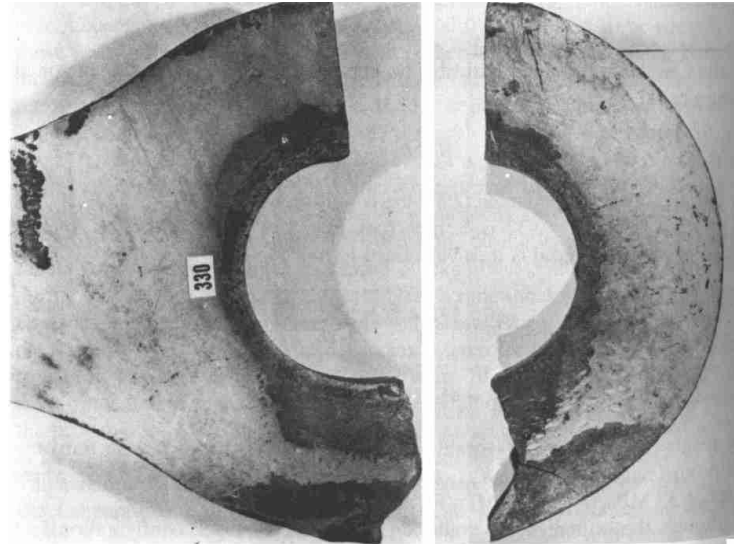
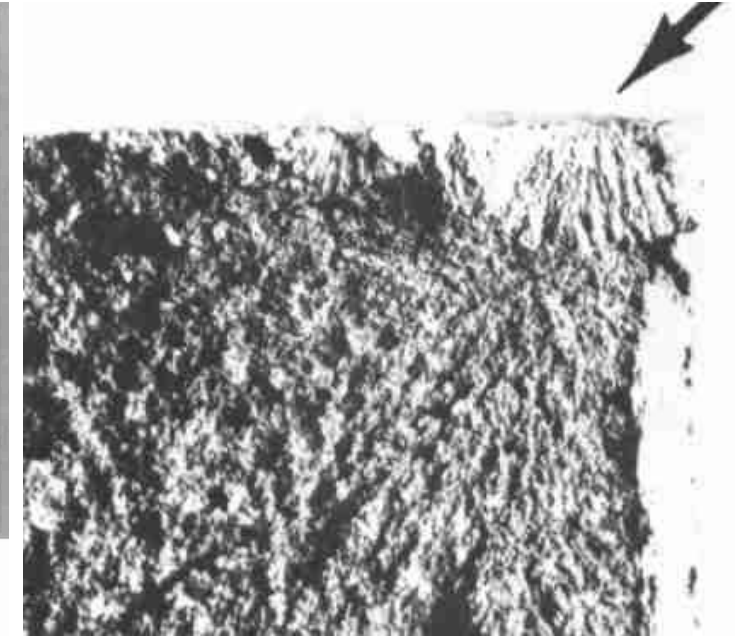
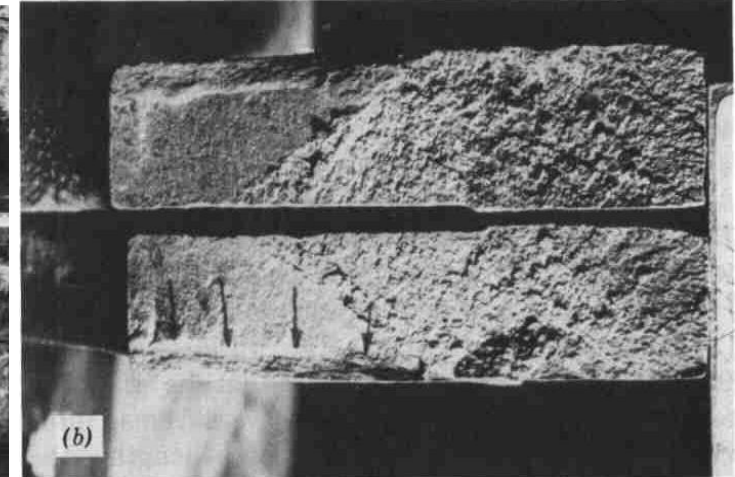


FIGURE 14.8 Fractured eyebar responsible for failure of Point Pleasant Bridge.¹⁹
(Reprinted from *Journal of Testing and Evaluation* with permission from American Society for Testing and Materials.)



Cracked eyebar showing forge laps on the eyebar surface (courtesy of Santa Fe Railroad).



Fracture surface showing initial forge lap crack, fatigue crack, and final fracture surface.

LECCIONES APRENDIDAS

- Las **causas principales** del colapso de la estructura fueron:
 - **Elección inadecuada** de las propiedades del material de la barras de ojo. **Baja tenacidad a fractura.**
 - 39 años de servicio previo al colapso originó un **proceso combinado de fatiga y corrosión** que inició y propagó fisuras.
 - **Baja temperatura** existente al momento del colapso.
 - El **diseño de los nudos** entre barras de ojo era de **difícil inspección.**
 - **Falta de redundancia estructural.**
 - Tareas de inspección y mantenimiento inadecuadas y/o deficientes.



LECCIONES APRENDIDAS

- La **tenacidad a fractura** de un acero es una **propiedad tan o más importante que la resistencia**, en estructuras sometidas a **cargas cíclicas**.
- La **redundancia estructural** es un **factor esencial** en el diseño de estructuras.
- Los **códigos y reglamentos actuales** (posteriores a la década del 70) **especifican claramente las propiedades del acero estructural** que debe utilizarse en la construcción de puentes.
- Los **elementos de fractura crítica** deben estar **claramente identificados** en la documentación constructiva para **facilitar** los futuros **trabajos de inspección y mantenimiento**.
- Las tareas de **inspección y mantenimiento son fundamentales** para asegurar la confiabilidad de una estructura durante su vida útil de servicio.

VIADUCTO LÍNEA 12 METRO CDMX

CASO DE ESTUDIO

El 3 de mayo de 2021, un tramo del viaducto de la línea 12 del Metro de la Ciudad de México, colapsó durante servicio.



CAUSAS PRINCIPALES (probables, en mayor o menor proporción)

- Falla de la composición estructural hormigón – acero y posterior pandeo lateral torsional de las alas comprimidas de las vigas de rigidez.
- Cantidad insuficiente de studs.
- Defectos unión soldada studs/vigas
- Daño acum. en uniones soldadas studs/vigas de rigidez y en empalmes.
- Distorsión inducida fuera del plano y Fractura inducida por Constricción
- Posible daño acumulado por ULCF debido a evento sísmico pasado.



CONSECUENCIAS

- Decenas de personas muertas y heridas
- Línea fuera de servicio durante un tiempo prolongado.



SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Luz del tramo: 30 m

Dos vigas de rigidez doble T
metálicas conectadas a corte a
un tablero de hormigón.

Viga secundaria de acero en
ensanchamiento del tablero.

Arriostramiento interno tipo K.

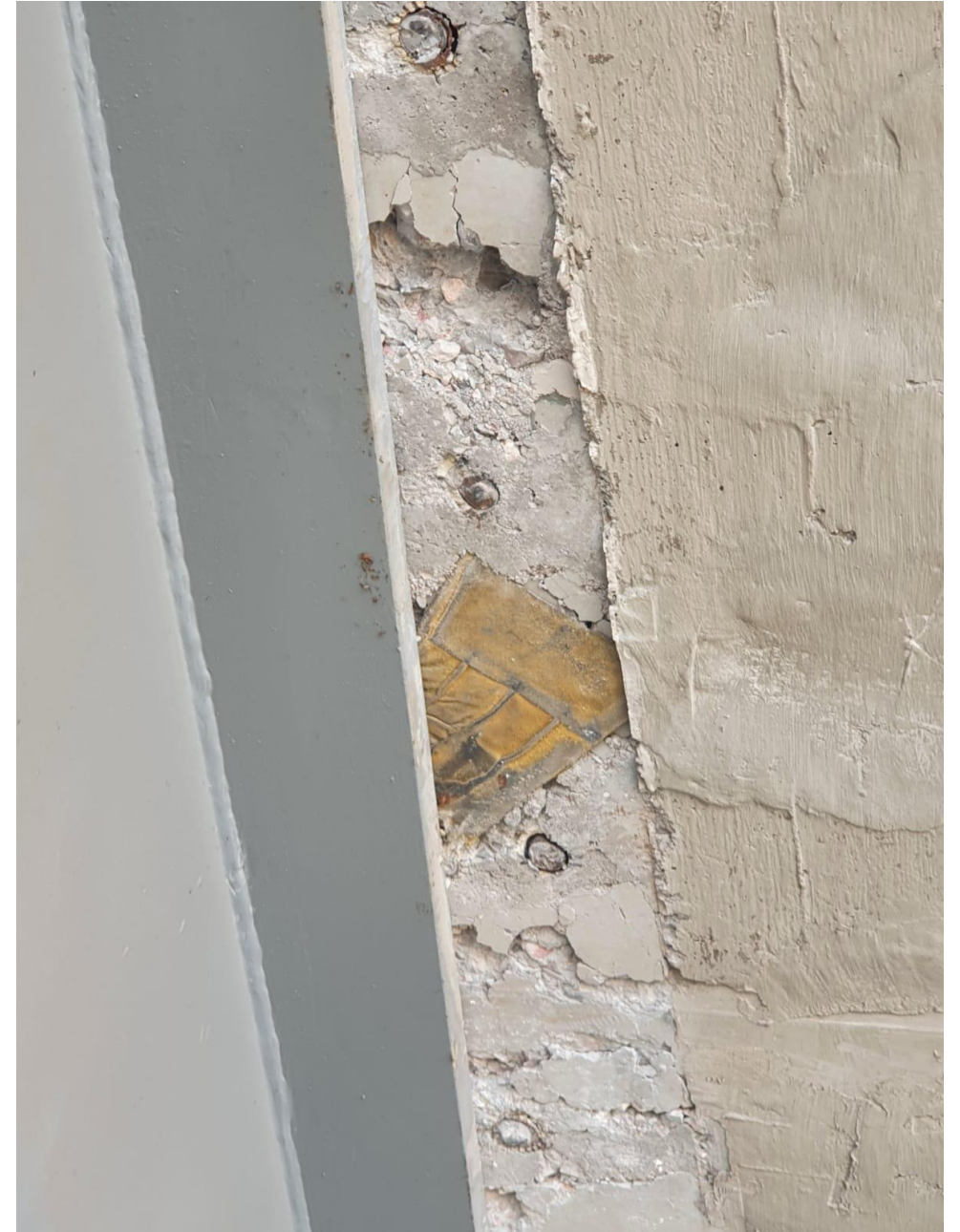


FALLA DE LA CONEXIÓN A CORTE – PANDEO LATERAL ALA COMPRIMIDA

Falla de la conexión a corte hormigón - acero.

Las uniones soldadas studs/viga son severamente solicitadas a fatiga en este tipo de estructuras y, probablemente, el estado de Fractura y Fatiga haya sido el dimensionante de la cantidad a disponer.

Asimismo, el arriostramiento interno en K puede inducir a deformaciones cíclicas fuera del plano para cargas asimétricas.



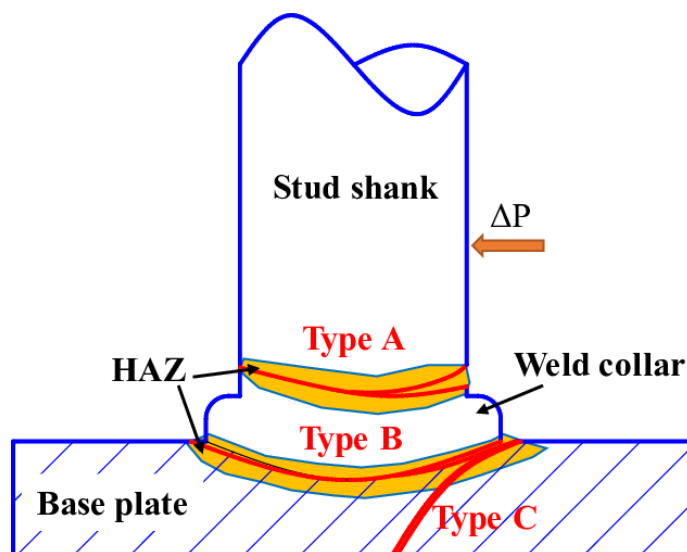
Fuente: información pública

FALLA DE LA CONEXIÓN A CORTE – PANDEO LATERAL ALA COMPRESIONADA

Pandeo lateral torsional de las vigas metálicas hacia el interior, luego de la falla de la acción mixta. Otra aspecto anómalo que se detectó fue la no eliminación de la protección cerámica de la unión soldada de los studs.



Fuente: información pública



Fuente: información pública

LECCIONES APRENDIDAS

- La probable causa principal del colapso parece encontrarse en la **pérdida de la composición estructural (acción mixta) hormigón – acero** y el posterior y consecuente **pandeo lateral torsional** de las **vigas de rigidez metálicas**. Es probable que un proceso de **daño acumulado por fatiga** haya afectado a las susceptibles uniones soldadas studs/vigas, lo que **explicaría los años de servicio previo al colapso**. Adicionalmente, dichas **uniones presentan anomalías** en su ejecución.
- Otros **factores concomitantes** que pudieron haber contribuido a la falla (en mayor o menor medida):
 - **Localización inconveniente de empalme soldado** de las vigas de rigidez. Alto rango tensional.
 - **Defectos generalizado en uniones soldaduras.**
 - **Infra-dimensionamiento a fatiga** en la cantidad de **studs**. Disposición anómala.
 - **Distorsión inducida fuera del plano y constricción lateral.**
 - **Aparente inadecuada rigidez** de los **arriostramientos internos** tipo K.



LECCIONES APRENDIDAS

- **Tensiones residuales** en uniones soldadas.
- **Daño acumulado por fatiga de alto ciclaje (HCF)** debido a las cargas de servicio
- Eventualmente, **daño acumulado por fatiga de ultra bajo ciclaje (ULCF)** por evento sísmico pasado.
- En general, las **características** de los **aceros** utilizados en **estructuras “nuevas”** son **adecuados** tanto en **tenacidad** como en **resistencia**. No aparenta, *prima facie*, ser un factor de relevancia en la causa del colapso.
- Lamentablemente, esta estructura **no poseía redundancia estructural**.
- En general las **causas de un colapso o fallo**, si bien poseen una causa preponderante, se explican por una **concomitancia de factores**. Este también aparenta ser el caso, lo cual será o no confirmado en el dictamen forense definitivo.

PUENTE DE CHIRAJARA

CASO DE ESTUDIO

El 15 de enero de 2018,
el puente vial Chirajara,
cercano a la Ciudad de
Bogotá Colombia,
colapsó durante su
construcción



CAUSAS PRINCIPALES

- Falla estructural de un pilón durante la construcción por errores de diseño.

CONSECUENCIAS

- 9 personas fallecidas y 8 heridas.



SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Puente atirantado.

Luz del tramo ppal.: 286 m

Luces tramos laterales: 80 m

Tablero: Vigas de rigidez long. y transv. de acero con losa de hormigón armado.

Pilón de perfil tipo diamante

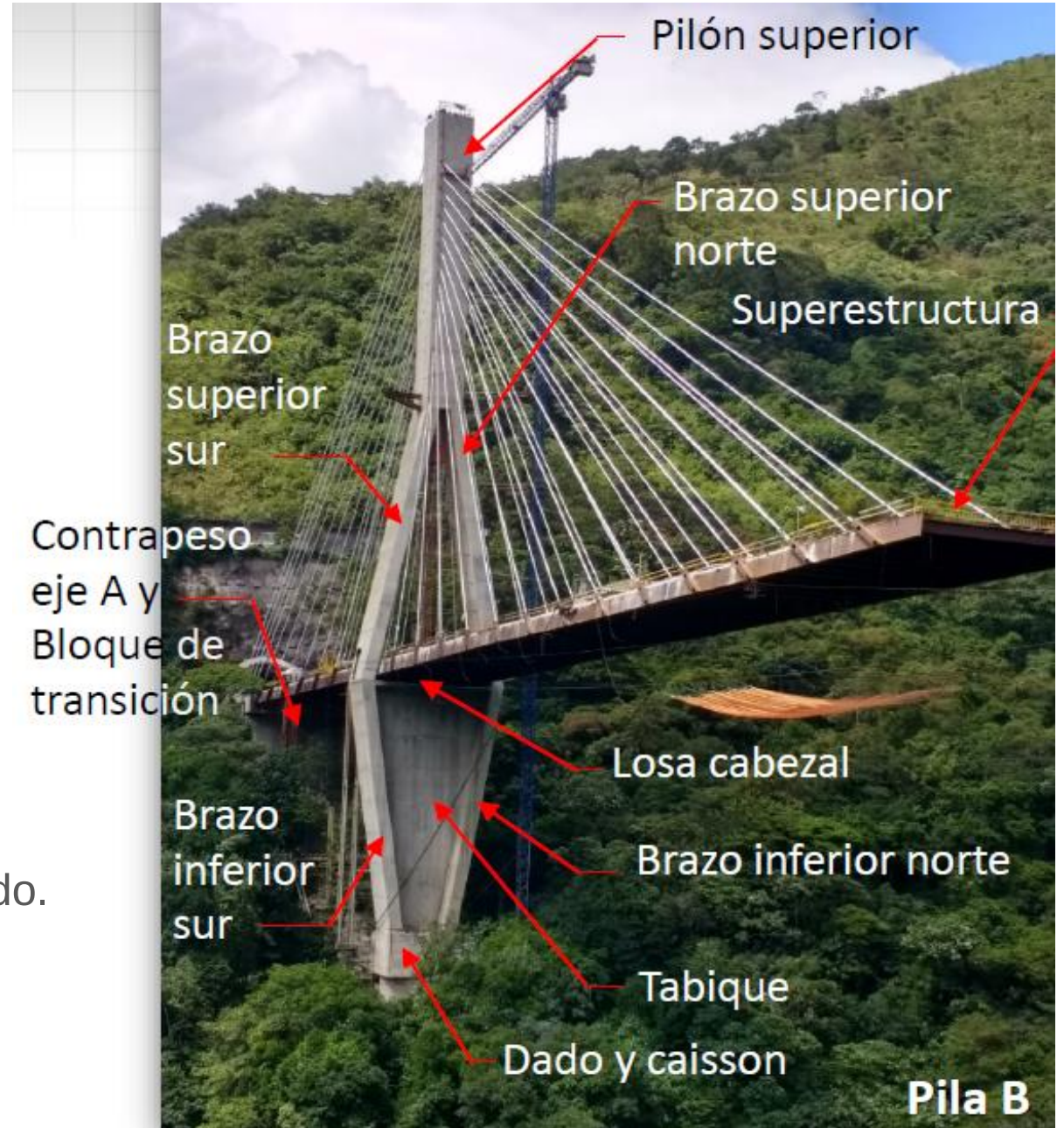
Parte superior del pilón, de acero.

Brazos superiores inferiores de hormigón armado.

Losa cabezal de hormigón postesado

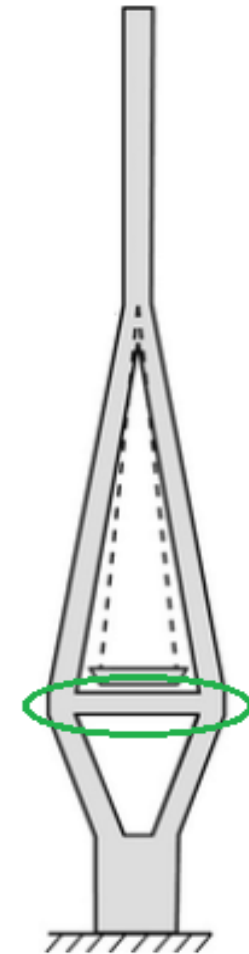
Tabique inferior de hormigón armado.

Fundaciones tipo *caisson* de hormigón armado

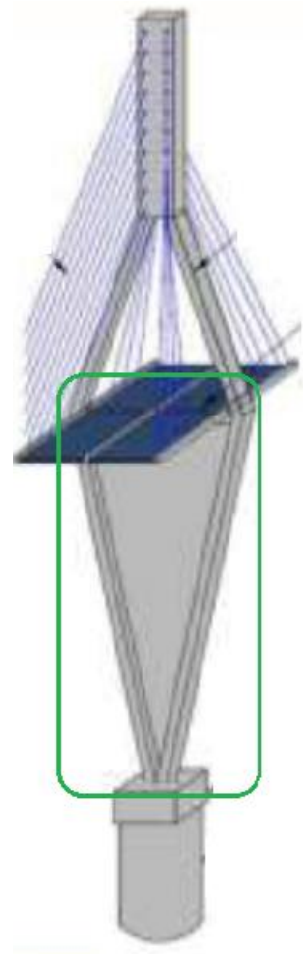


ERROR DE DISEÑO

Hipótesis estructural incorrecta sobre el trabajo conjunto entre la losa cabezal postesada y el tabique de hormigón armado. El tiro de postesado de la losa fue insuficiente para absorber las fuerzas de desvío.



Pilón tipo
diamante,
típico



Inusual pilón
tipo diamante

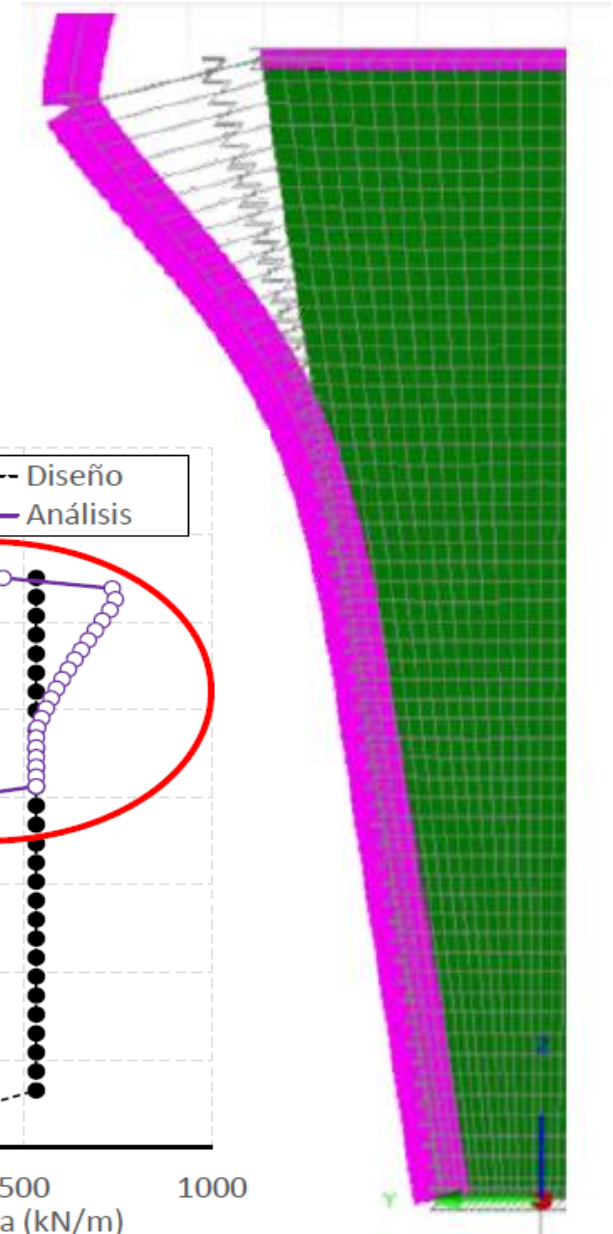
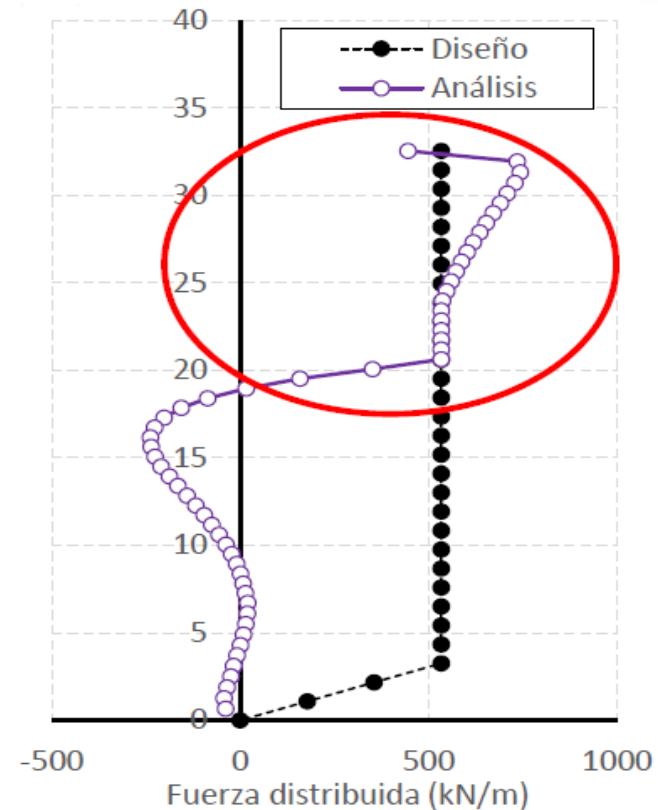
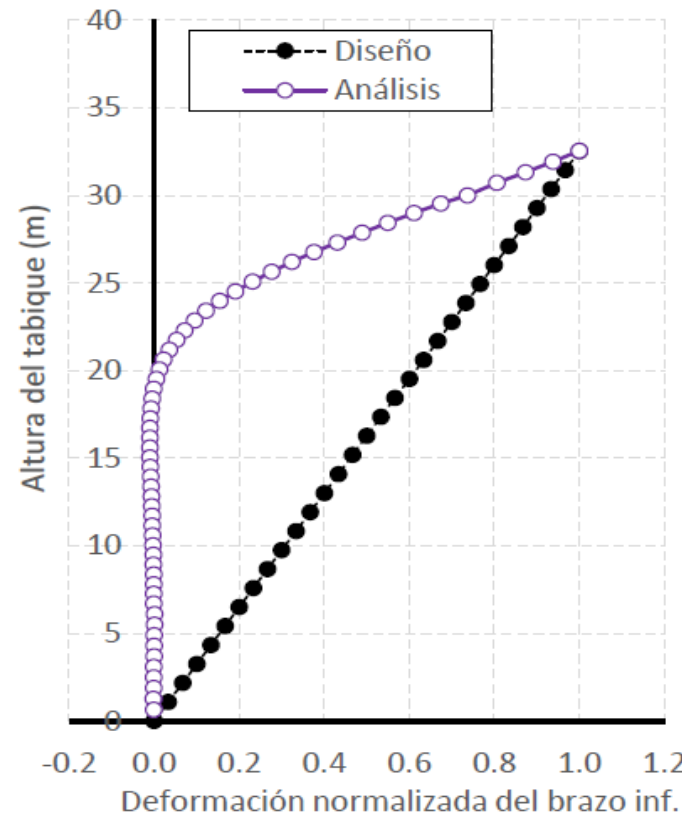
SUPERFICIES DE FRACTURA

Superficies de fractura dúctiles de las barras de armadura. Este hecho indica que dichas barras llegaron a fluencia con el consecuente alargamiento lo que provocó el incremento de la deformación lateral de los brazos del pilón que generó un proceso progresivo de inestabilidad hasta el colapso.



DISTRIBUCIÓN DE CARGAS Y DEFORMACIONES

Distribuciones de cargas y deformaciones supuestas en el diseño y en los análisis forenses. La mayor parte de la sollicitación debía ser absorbida por la losa transversal de unión entre brazos. El aporte del tabique fue de baja consideración.



LECCIONES APRENDIDAS

- Las **causa principal** del colapso de la estructura fue un procesos progresivo de **inestabilidad** de **uno de los pilones** tipo diamante debido a un **incorrecto diseño y dimensionamiento** estructural para **absorber los esfuerzos de desvío**.
- Las **superficies de fractura** de la **armadura** demuestran un proceso de **fractura dúctil** con la consecuente **excesiva deformación transversal de los brazos del pilón**. Este hecho fue corroborado, analíticamente, en el análisis forense ejecutado.
- El **diseño del pilón fue inusual**. El **aporte del tabique** para absorber las fuerzas de desvío fue de **baja consideración y muy sobreestimado** en el diseño y dimensionamiento estructural. Un diseño **más adecuado** para absorber el desvío hubiese sido un **losa transversal suficientemente postesada** para absorber la totalidad de dichos esfuerzos.



LECCIONES APRENDIDAS

- **Diseño inusuales** pueden ejecutarse, y en ciertos casos, pueden ser bienvenidos, pero deben ser **analizados muy profundamente**, más allá de lo habitual.
- Una vez más en obras de gran envergadura, la **revisión por pares**, también, **falló**.

PUENTE NANFANGAO

CASO DE ESTUDIO

El 1 de octubre de 2019,
el puente Nanfangao en
Taiwan, colapsó en
servicio.



CAUSAS PRINCIPALES

- Larga exposición en ambiente **salino** que produjo la **corrosión** de los **cables** de suspensión.
- Largo periodo (20 años) de **vibración inducida** por la acción del **viento** que produjo daño por **fatiga en los anclajes de cables**.

CONSECUENCIAS

- 6 personas muertas y 12 heridas.



SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Puente atirantado de arco y tensor. Arco simple, de acero.

Luz: 140 m

Ancho: 15 m

Altura: 18 m



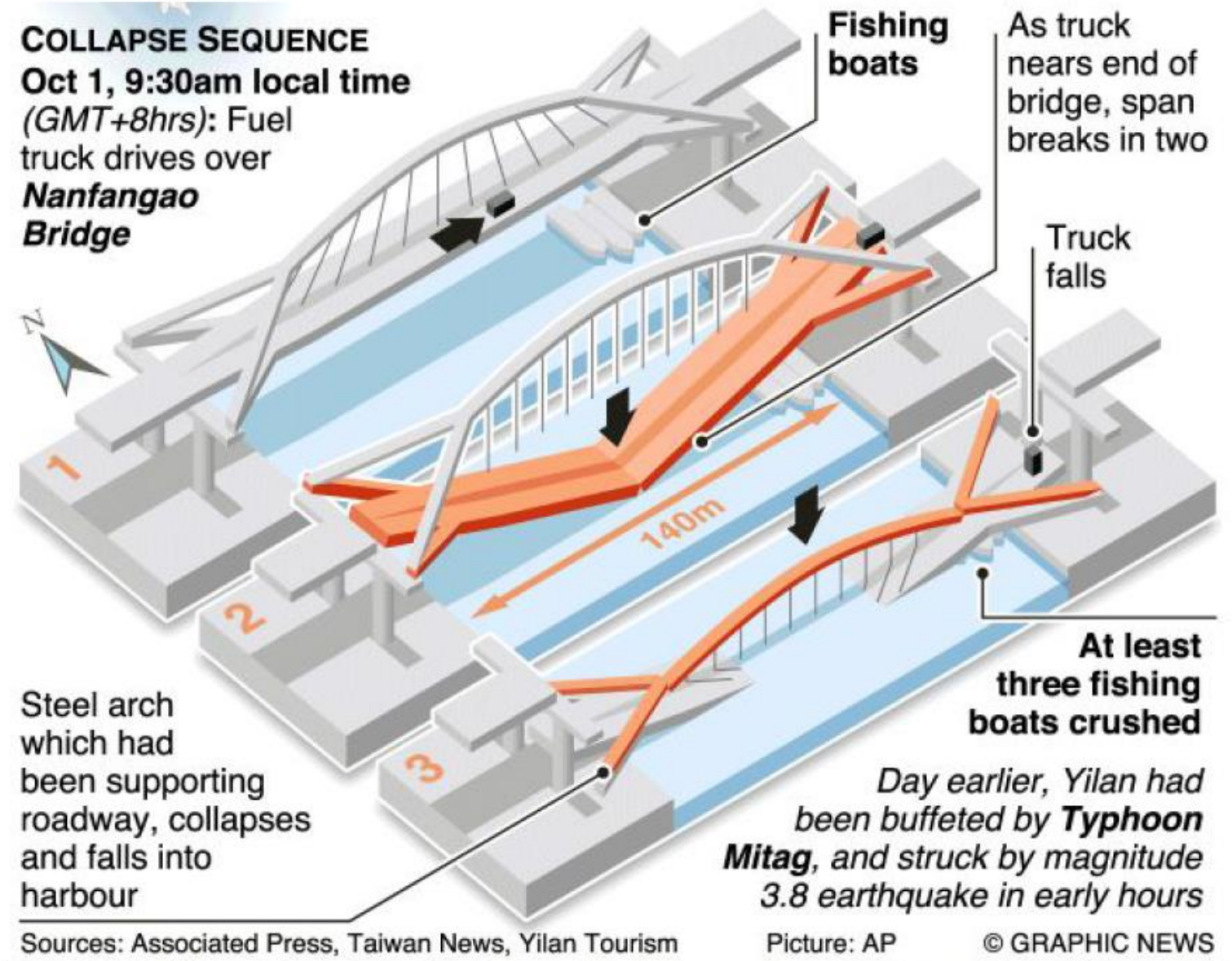
SECUENCIA DEL COLAPSO

Largo proceso corrosivo
sobre los cables

Fatiga inducida por el
vibración debido al viento.

Paso de un camión al
momento del colapso

Posible influencia de un
evento sísmico cercano, el
día anterior al colapso.



GN39561 Graphic shows where the accident happened and how the bridge collapsed.

SECUENCIA DEL COLAPSO

Varios tensores fallaron en el momento en que un camión cruzaba el puente. Dicho cruce fue el último suceso concomitante que llevó al puente al colapso.



“EFECTO DOMINO”

El “efecto dominó”, secuencia incontrolada de fallos sucesivos, es una característica indeseable de estructuras sin redundancia que llevan al colapso total de la estructura.



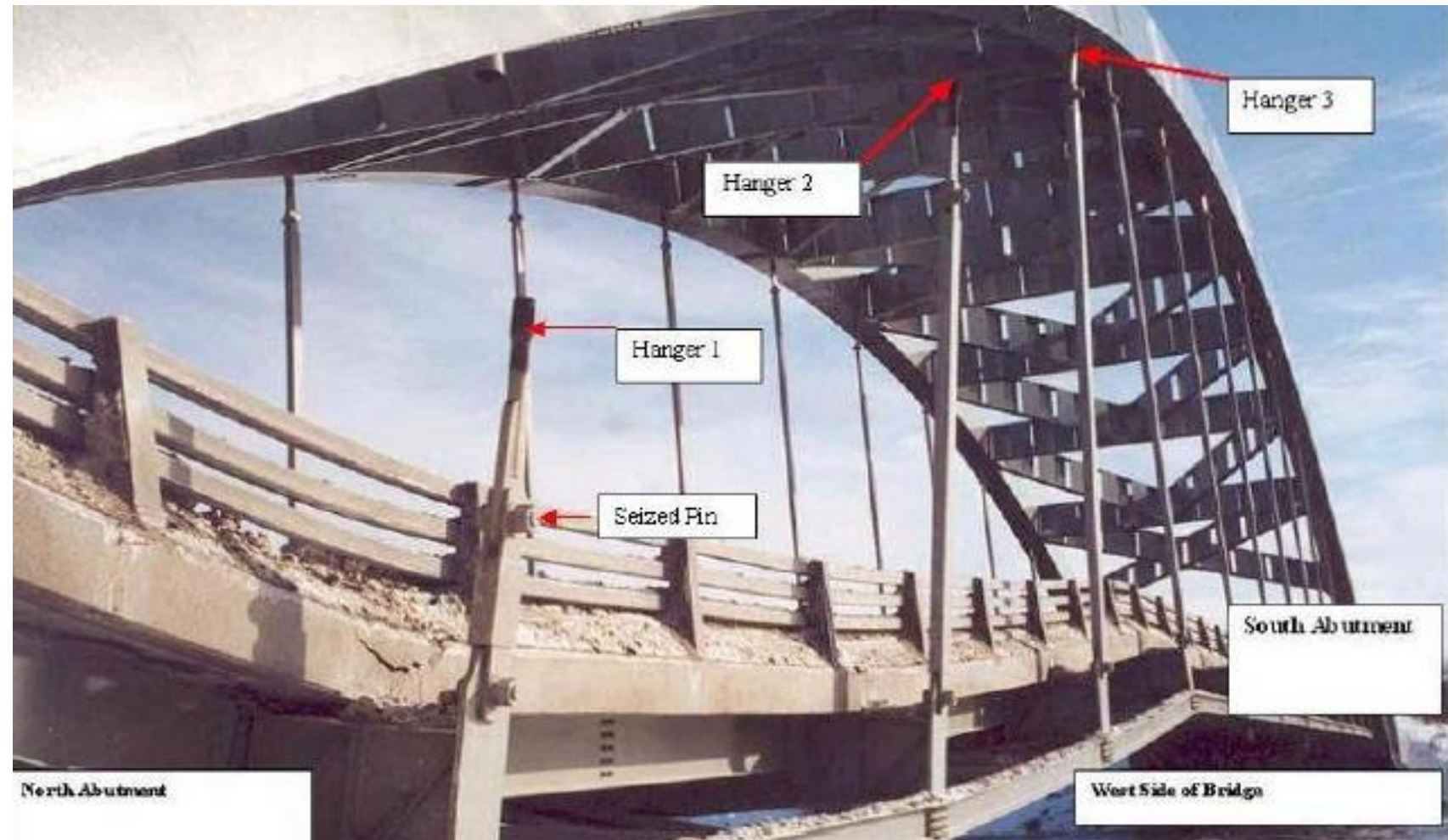
LECCIONES APRENDIDAS

- Las **causas principales** del colapso fueron la **prolongada exposición** (20 años) en un ambiente de alta salinidad (alta agresividad corrosiva) y un **largo proceso de fatiga inducida por vibraciones debida al viento**, generándose el nocivo proceso de **corrosión bajo tensión cíclica**, especialmente agresivo en **aceros susceptibles**, como el de los cables.
- La tensión generada por el **cruce del camión** en el momento del colapso fue probablemente el **último hecho comitente**. Como hecho a destacar, el día anterior al colapso, un sismo de magnitud 3,8 azotó la zona de Yilan, cercana al puente. Su posible influencia en el colapso no se encuentra, claramente, determinada.
- La **corrosión bajo tensión estática o cíclica** en **acero susceptibles** como el de cables, es un factor crucial que puede derivar en inesperados y **catastróficos fallos**.
- Una vez más, la **concomitancia de factores** de largo plazo, sobre **elementos de fractura crítica** (sin redundancia estructural) deriva en colapsos catastróficos.

PUENTE SGT. AUBREY COSENS V.C MEMORIAL

CASO DE ESTUDIO

El 14 de enero de 2003, el Puente Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial en Latchford, Canadá, falló parcialmente durante el paso de un camión, descendiendo aprox. 2 m.



CAUSAS PRINCIPALES

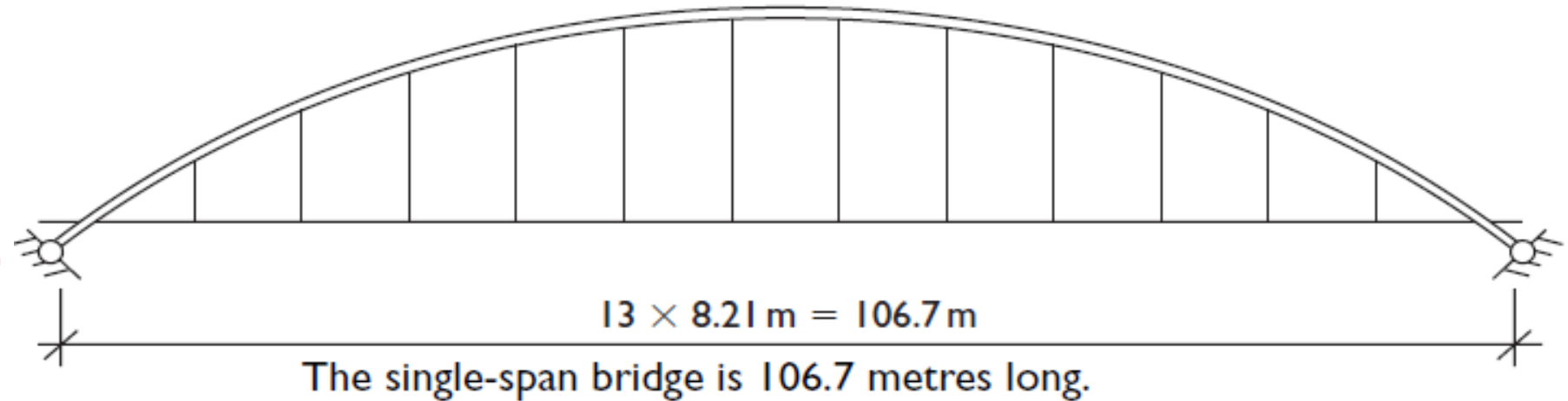
- La causa principal de la falla parcial fue la **fractura inducida por fatiga** de tres **barras de acero de suspensión**.

CONSECUENCIAS

- No se registraron personas muertas ni heridas.
- Fuera de servicio temporal.

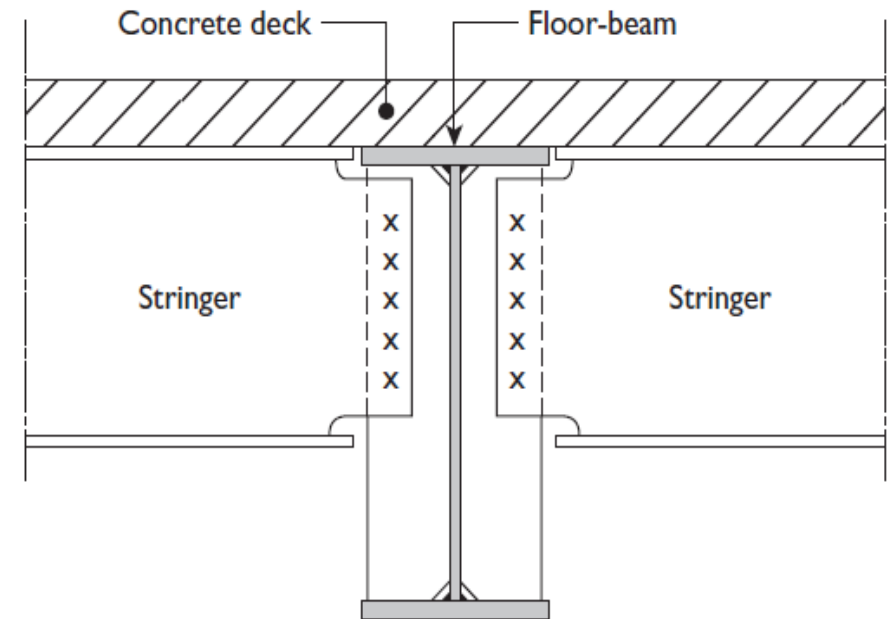


SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL



Puente colgante de arco.

Tablero de entramado de vigas de acero y losa de hormigón. El diseño original no contempló la acción compuesta. En los trabajos de **rehabilitación**, posterior a la falla, se generó la **composición estructural hormigón - acero**.

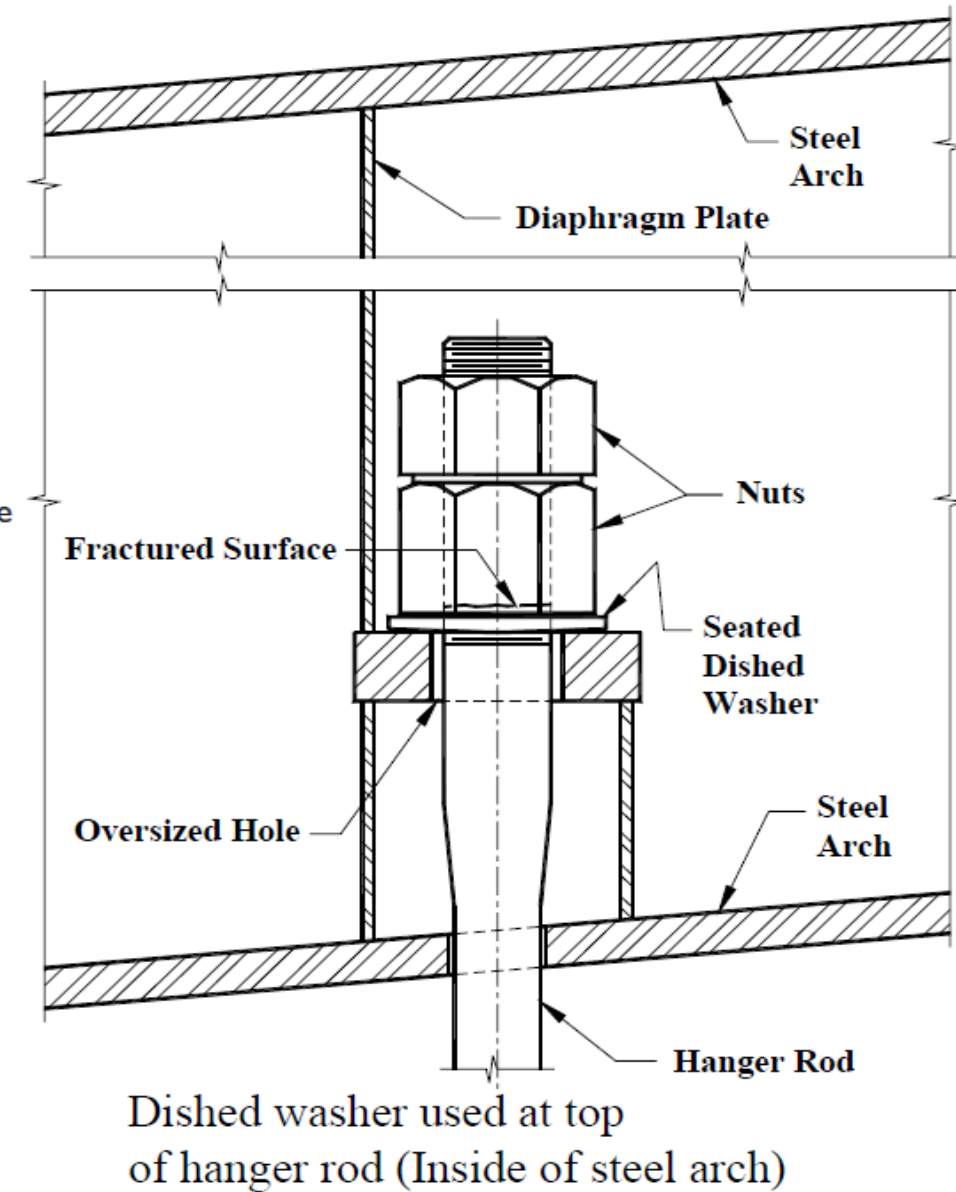
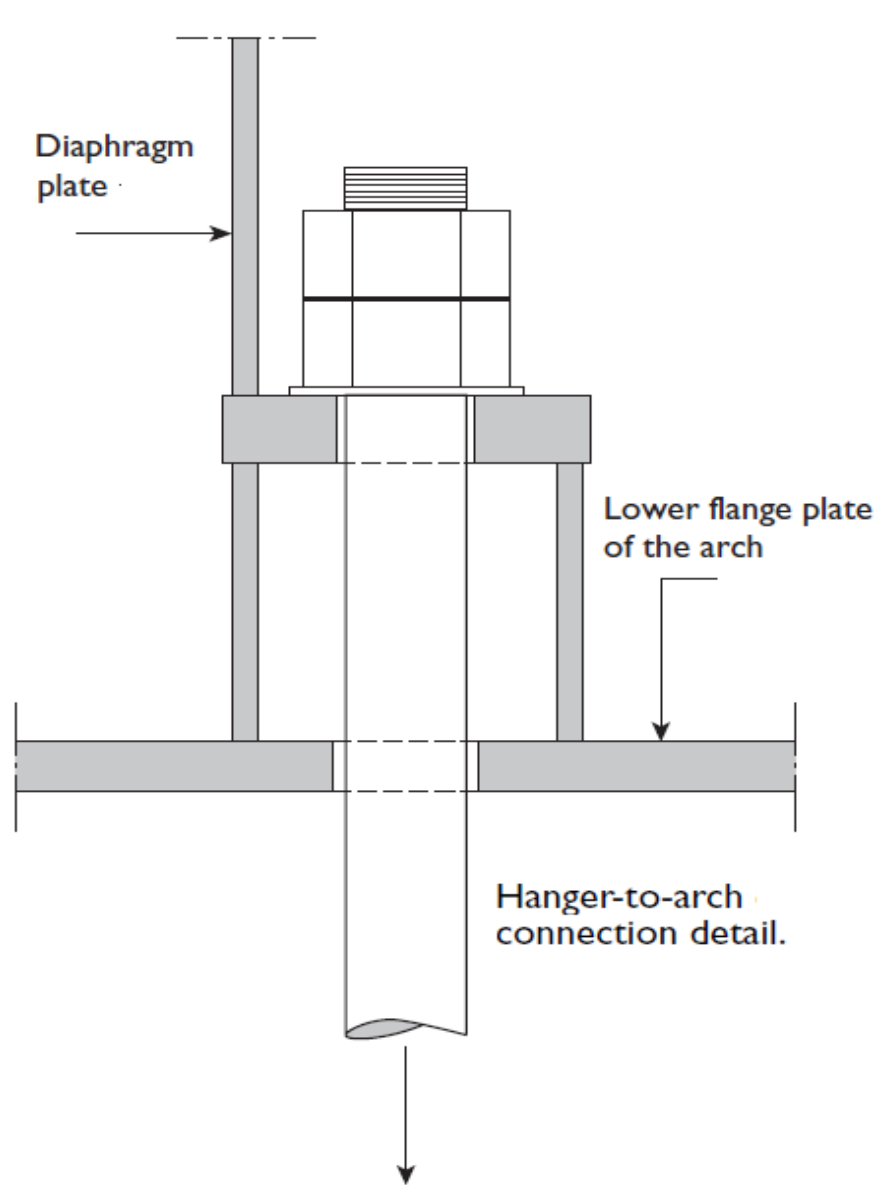


Stringer-to-floor-beam connection (principal layout).

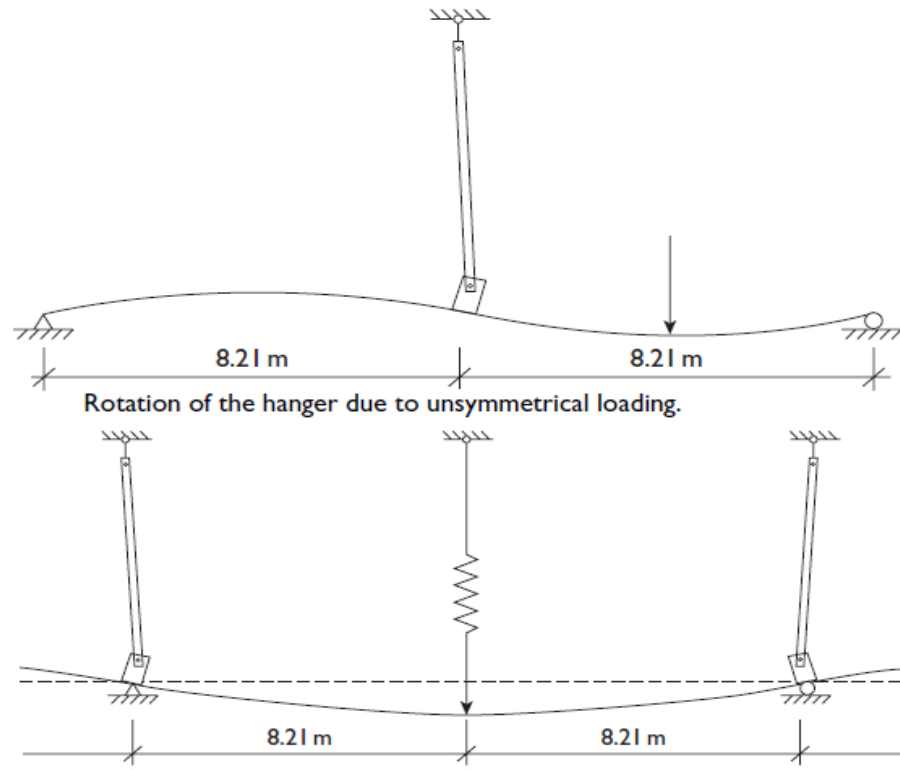
DETALLE CRÍTICO

Detalle de unión de las
barras de suspensión.

Sin posibilidad de
inspección.

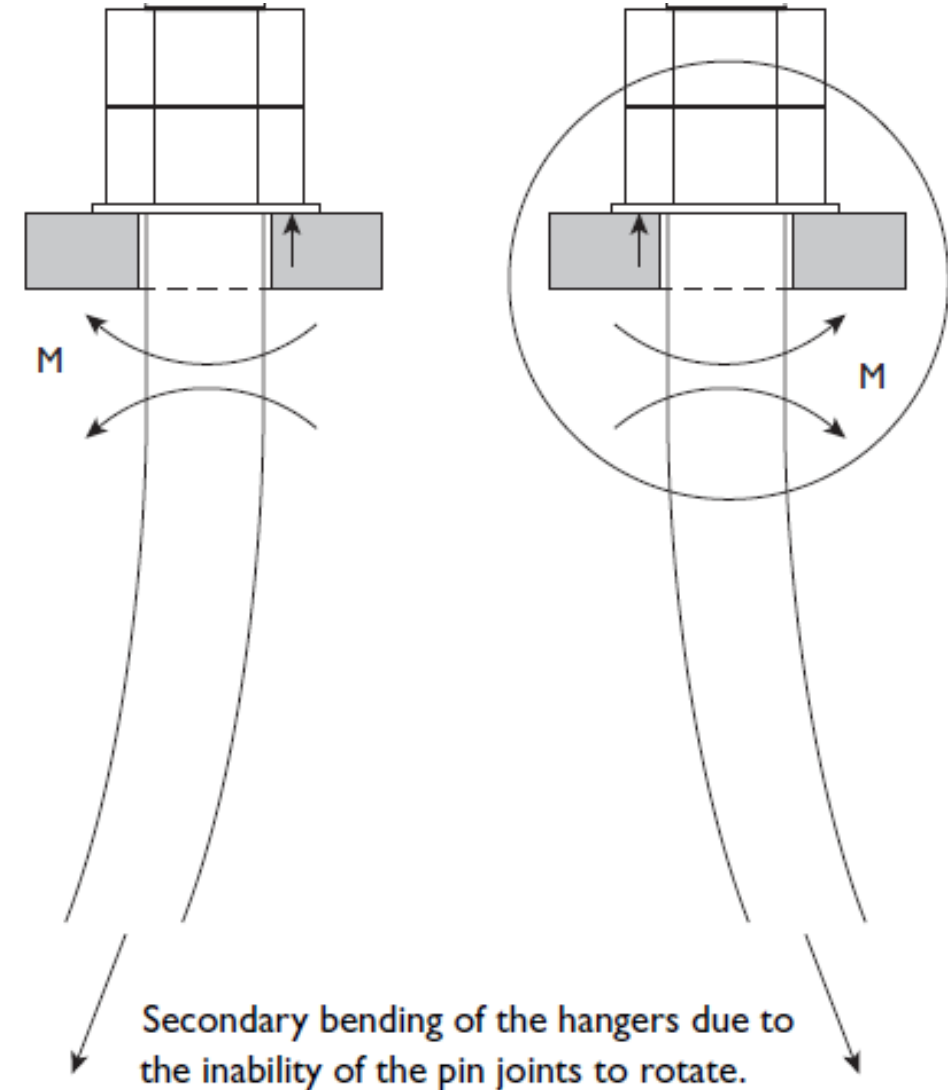


DETALLE CRÍTICO

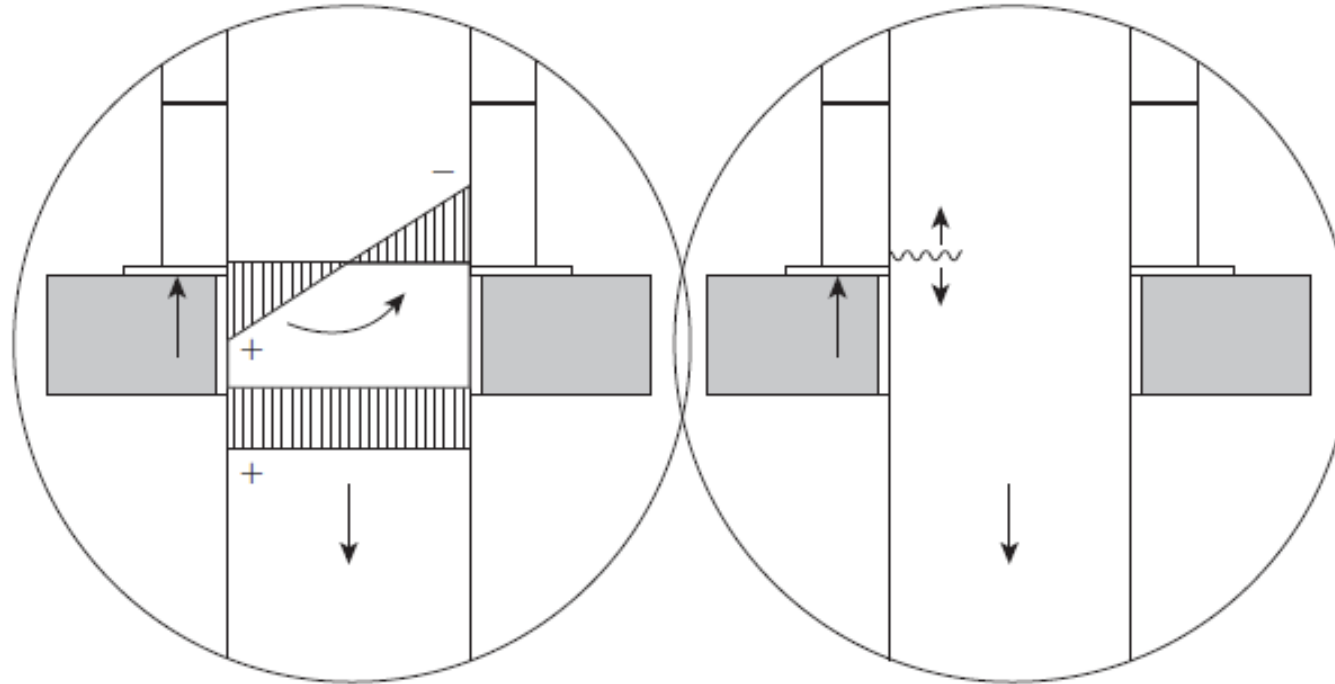


When a floor-beam is subjected to a concentrated load, the difference in deflection makes the adjacent hangers rotate. For the sake of simplicity the adjacent hangers have been kept rigid in the description above, which, of course, they are not.

Momentos secundarios sobre las barras de suspensión debido a **cargas cíclica asimétricas**, que produjeron el **giro cíclico de las uniones** de las barras y el arco.

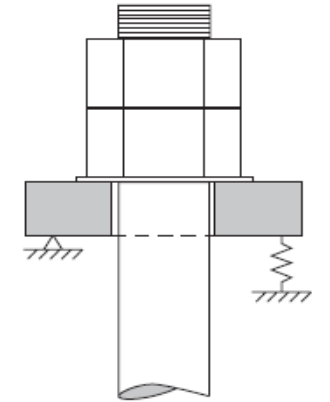


DETALLE CRÍTICO

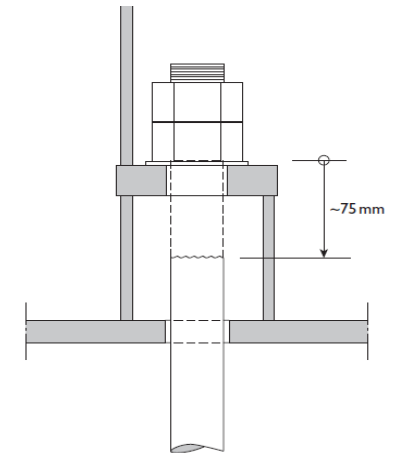


Secondary bending stresses, in addition to the normal tension stress, will eventually initiate a fatigue crack

Tensiones secundarias por flexión cíclica que iniciaron y propagaron fisuras en las barras de acero, de inadecuada tenacidad a fractura. Adicionalmente, el diseño del detalle **no permitía** una correcta tarea de **inspección**.



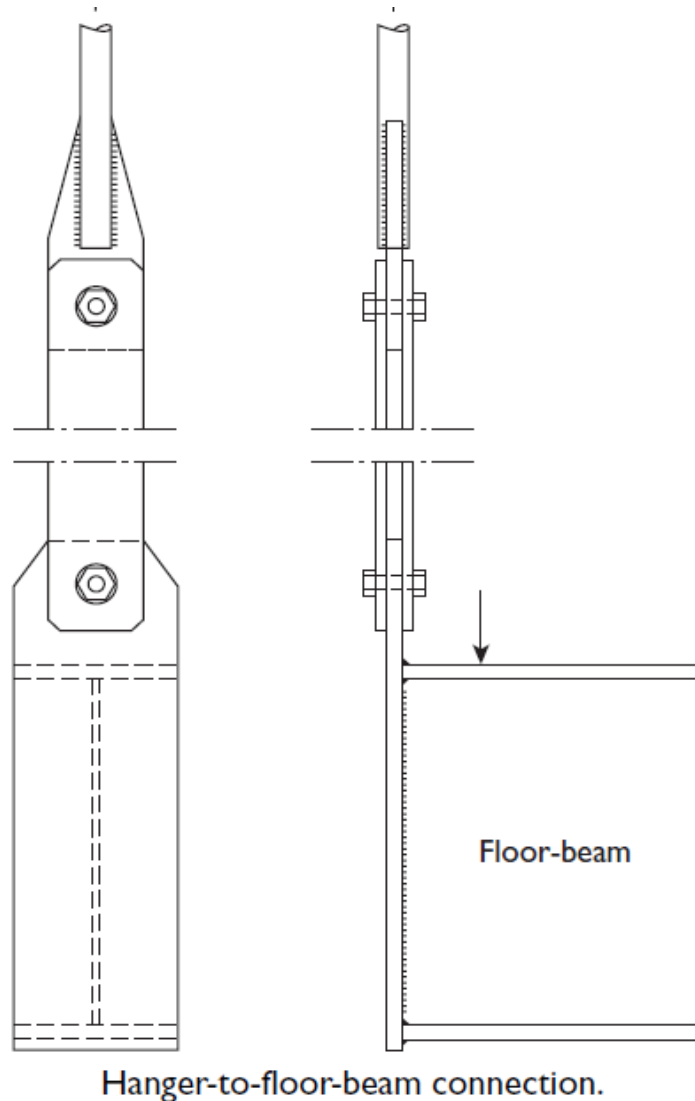
The support conditions – a difference in stiffness due to the single diaphragm plate



Fracture of Hanger 1 (the one closest to the abutment on the northwest corner of the bridge).

DETALLE CRÍTICO

Unión inferior entre las barras de suspensión y las vigas transversales de tablero. Otro **diseño inconveniente** en un elemento de **fractura crítica**.



Typical seized pin



Possible over-tightened nut or crevice corrosion causing distortion of washer.

CORROSIÓN - FATIGA

Fenómeno de **corrosión-fatiga** en las barras de suspensión.

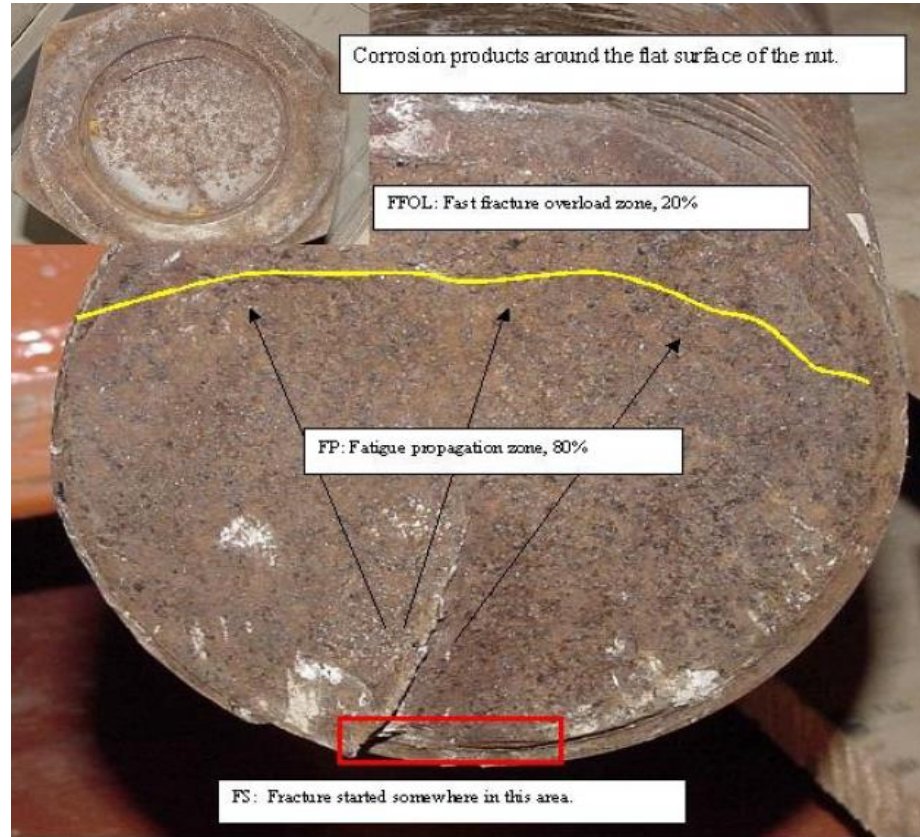
Las **fisuras** por fatiga se iniciaron muchos años antes de la falla y **no fueron detectadas en los trabajos de mantenimiento** previos. Otras barras fisuradas fueron detectadas luego de la falla.

Chemical analysis of the corrosion product revealed the following:

Location	Age of Corrosion Product on Fast Fracture Face	Comments*
		(* See Appendix B for details)
Hanger 1 (Northwest)	5 to 7 years	Fatigue crack likely started several years earlier at the location where an attempt may have been made to grind a defect out of thread when the bridge was constructed in 1960
Hanger 2 (Northwest)	1 to 3 years	Fatigue crack likely started after Hanger 1 (NW) had failed
Hanger 3 (Northwest)	0 years	January 14, 2003 (Time of partial collapse of deck)
Hanger 1 (Southwest)**	5 to 7 years	Fatigue crack likely started several years earlier at the location where damage occurred on the threads when the bridge was constructed in 1960

***Subsequent to the partial collapse of the deck, it was discovered that an additional 6 Hangers were cracked and Hanger 1 (SW) was fractured completely. This was determined by the structural steel inspection described in Appendix C. It should be noted that once it was determined that Hanger 1 (SW) was fractured, it was removed from the bridge and sent to the metallurgist for analysis. The metallurgist states in his report that he believes Hanger 1 (SW) fractured 5-7 years ago and that the fracture started in a damaged portion of the threaded part of the rod (beneath the nut). He came to this conclusion by observing that the corrosion product on Hanger 1 (NW) and Hanger 1 (SW) were similar. (See Appendix B). The metallurgist also believes that the initial damage in the threads occurred at the time of installation of the hangers. The metallurgist also noted that grey paint is present on the fractured surface of Hanger 1 (SW). This is significant in that the bridge was last painted in 1998 and Hanger 1 (SW) must have been completely fractured at that time in order for paint to be present on fractured surface.*

SUPERFICIES DE FRACTURA



Hanger 1 (NW) – Fracture Face

Superficie de fractura en la zona roscada de una barra de suspensión. Superficies diferenciadas de propagación y de fractura rápida. Productos de corrosión, también, fueron detectados.



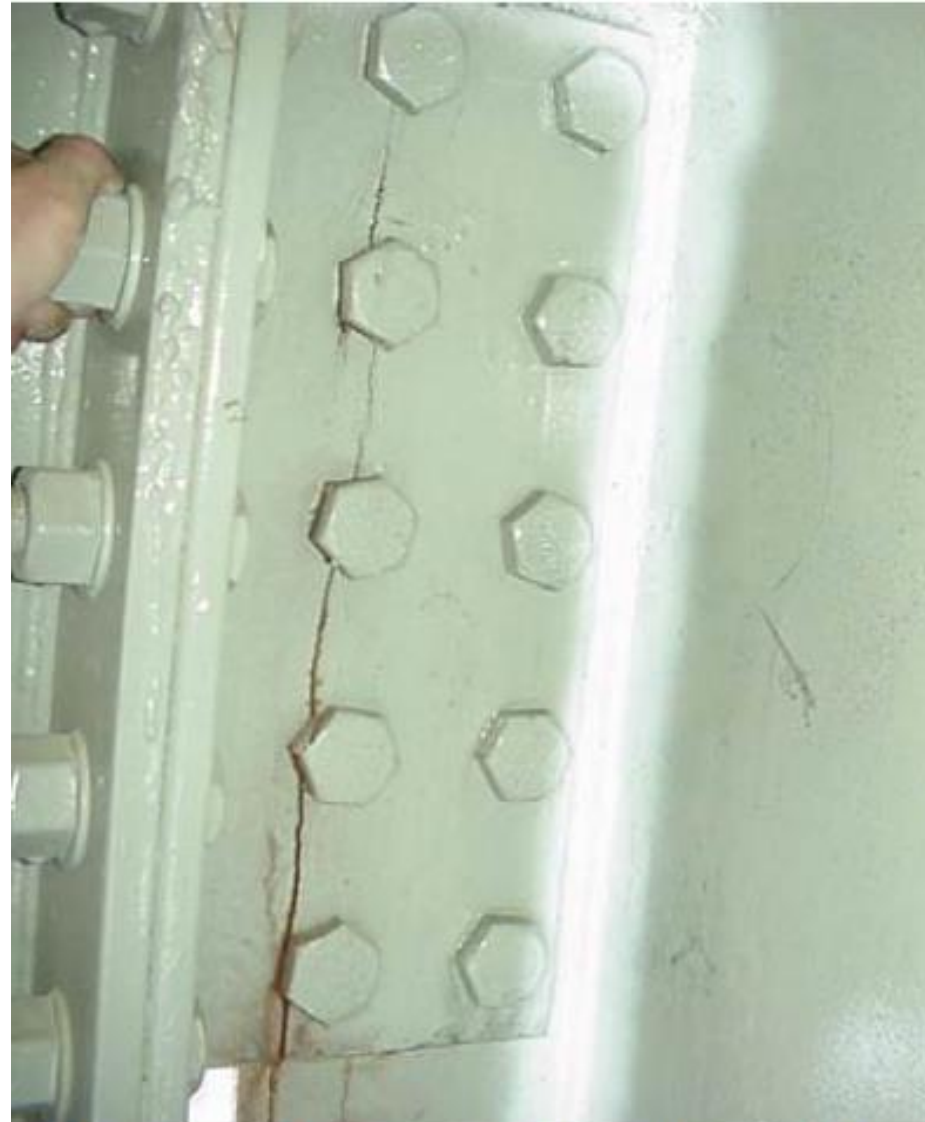
Hanger 1 (NW) – Shiny Area - Ground down threads.



Hanger 1 (NW) – Threaded Area Showing Signs of Wear, Abrasion, and Impact Damage

FISURACIÓN POR FATIGA

Otras fisuras por fatiga fueron detectadas, post falla, en las uniones entre largueros exteriores y vigas transversales.



Exterior stringer to floor
beam #1 connection (NW corner)

Exterior stringer to floor beam 1 connection (SW corner)



LECCIONES APRENDIDAS

- Las uniones inferiores de las **barras de suspensión** causaron indeseables e inesperadas **tensiones por flexión cíclica** que generaron fatiga en las barras, llevándolas a sus fracturas.
- La parte roscada de las barras se encontraban **ocultas para su inspección**.
- El **acero** de las barras de suspensión poseía una **inadecuada tenacidad a fractura a bajas temperaturas**.
- **Inadecuadas tareas de inspección y mantenimiento** no previnieron la falla.
- En general, el **fenómeno de fatiga no se abordaba correctamente** en el diseño de puentes antiguos (**previo a los años 70**).

LECCIONES APRENDIDAS

- ☐ En estructuras sometidas a cargas cíclicas, **simplificaciones** usuales y hasta conservadoras, **válidas únicamente** en estructuras sometidas a **cargas predominantemente estáticas** pueden derivar en **tensiones secundarias** ignoradas o subestimadas que pueden **iniciar fisuras luego propagadas por fatiga**.
- ☐ La **tenacidad a fractura** es una propiedad esencial de los aceros que debe ser correctamente elegida, a temperaturas por debajo de la mínima de servicio, mas aún en elementos de fractura crítica.
- ☐ Como otras tantas veces, el fenómeno de **fatiga en elementos de fractura crítica** produjeron la falla de un puente.
- ☐ **Trabajos inadecuados de inspección** derivados del diseño inconveniente de detalles constructivos es otro factor usual en este tipo de fallas.

PUENTE SOBRE EL RÍO NIPIGON

CASO DE ESTUDIO

El 10 de enero de 2016,
el puente vial sobre el río
Nipigon en Ontario
Canadá falló durante el
servicio.



**Nipigon River Bridge, 600mm uplift of north
bridge edge at west abutment, January 10th, 2016**

CAUSAS PRINCIPALES

Fractura de un apoyo abulonado debido a un procesos de fatiga por deformación plástica de bajo cilcaje.

CONSECUENCIAS

- No hubo muertos ni heridos.
- Fuera de servicio, temporal.
Trabajos de rehabilitación.
- El tablero se separó de la calzada, desplazándose verticalmente hacia arriba, 60 cm



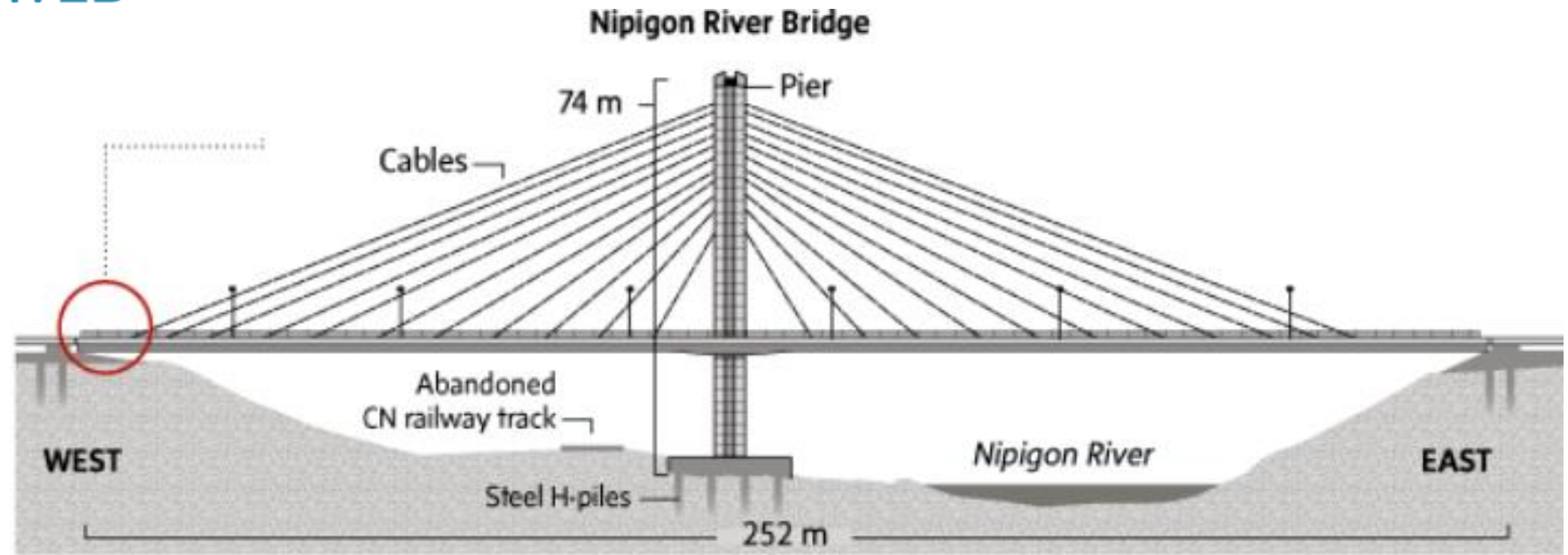
SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Puente atirantado
anclado.

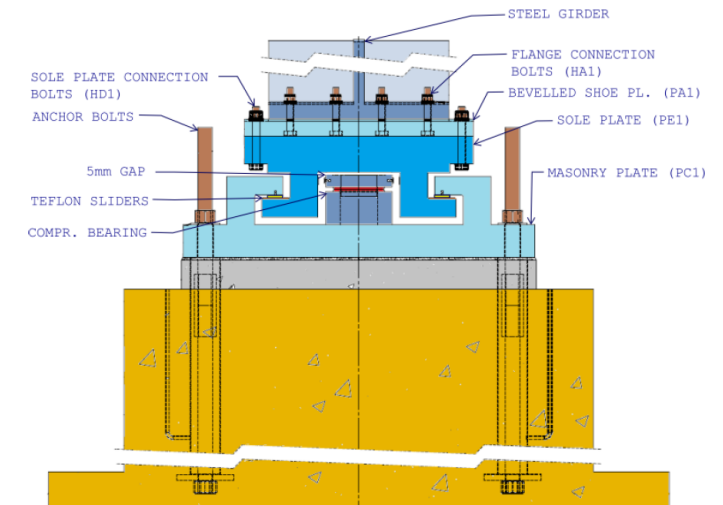
Longitud total: 252 m

Vigas de rigidez de
acero.

Detalle del apoyo
abulonado de
anclaje



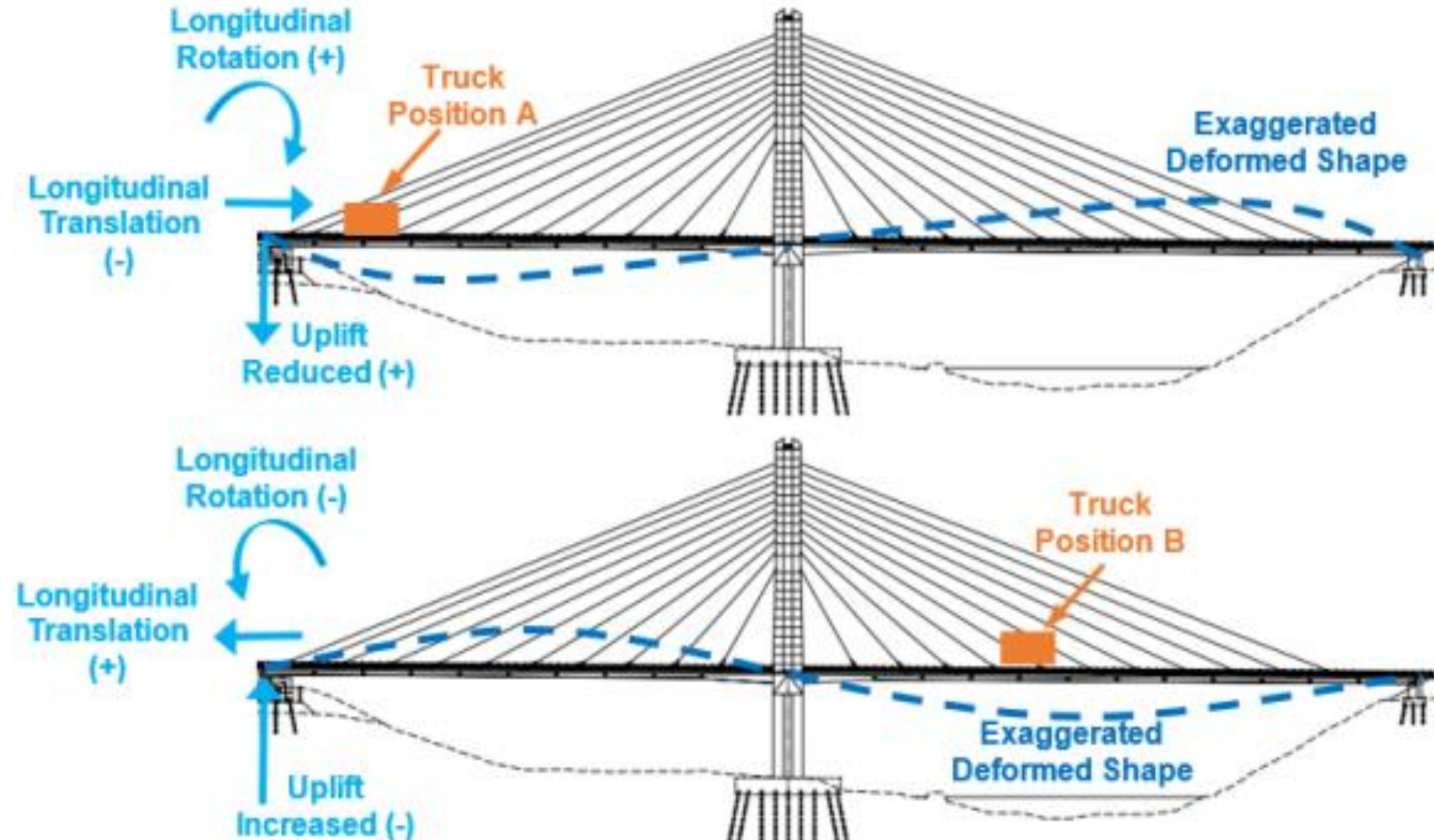
Centre-west bearing in place. Bevelled shoe plate is seen between girder flange and bearing sole plate.



Bearing Nomenclature

FATIGA DE BAJO CICLAJE EN APOYO DE ANCLAJE

Acción de levantamiento cíclico (tracción cíclica) en el apoyo extremo de anclaje atirantado anclado.

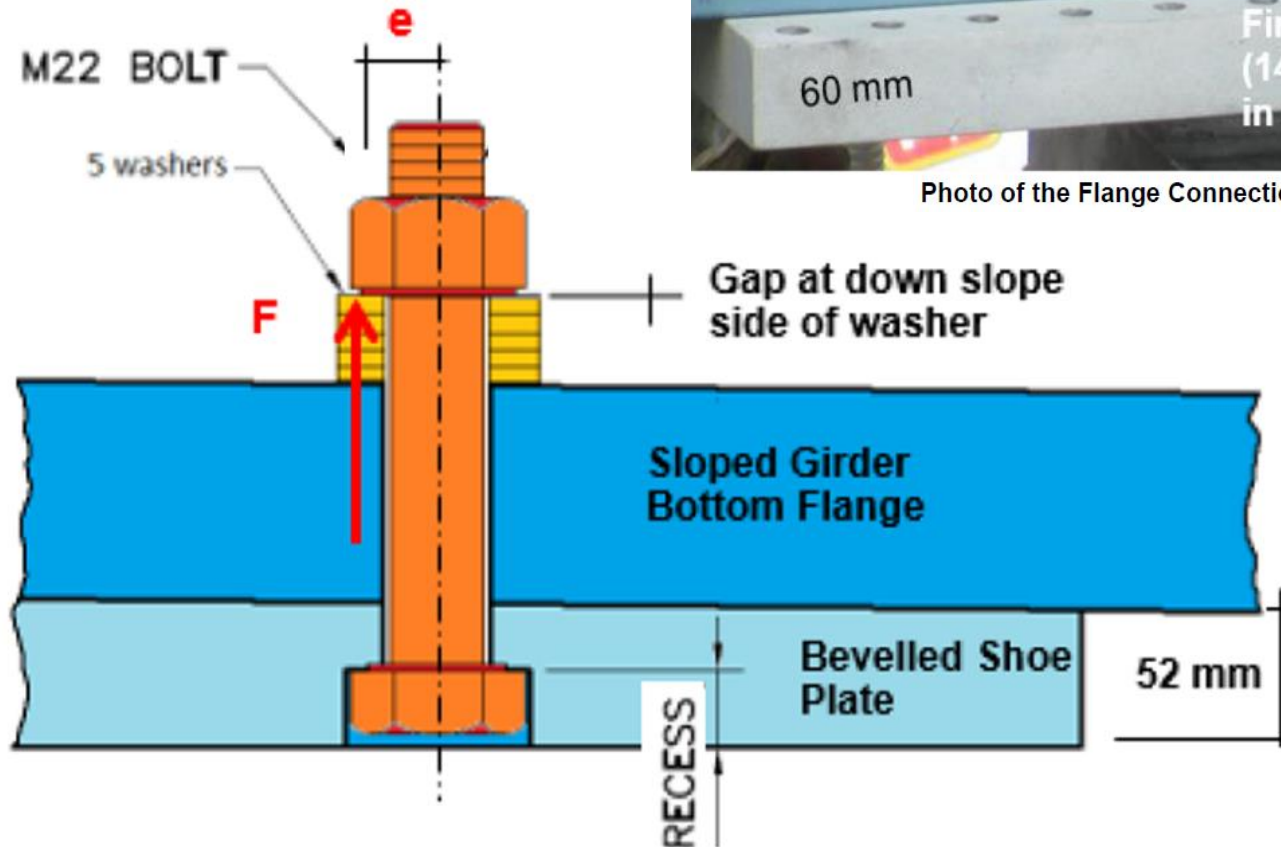


Truck positions for governing north-west bearing demands

INADECUADA INSTALACIÓN DE LOS BULONES DE ANCLAJE

El uso de arandelas planas en lugar de arandelas cuña, introdujo fuerzas excéntricas.

Largo incorrecto de los bulones



Eccentric force application on the bolt as a result of the use of flat washers

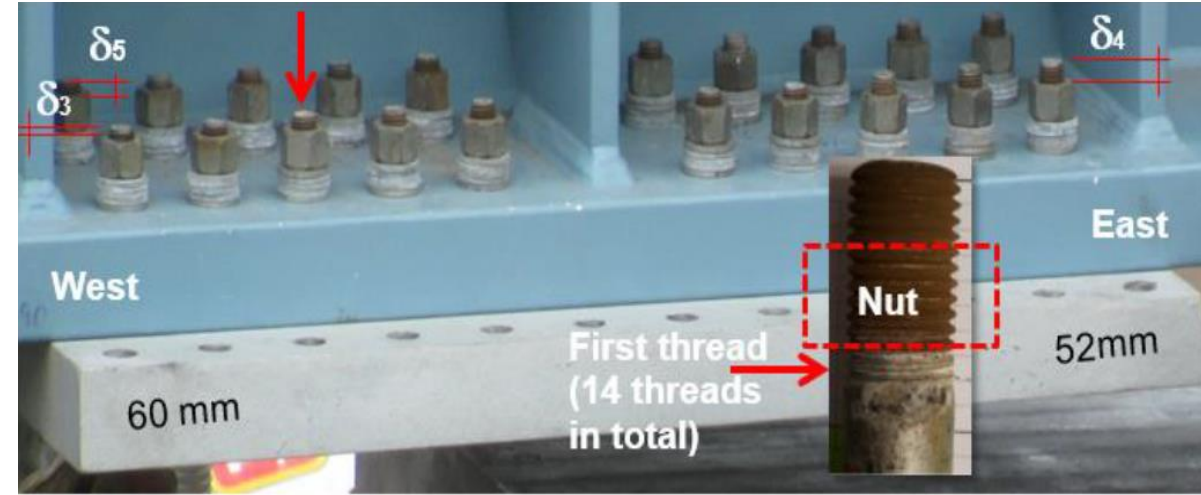
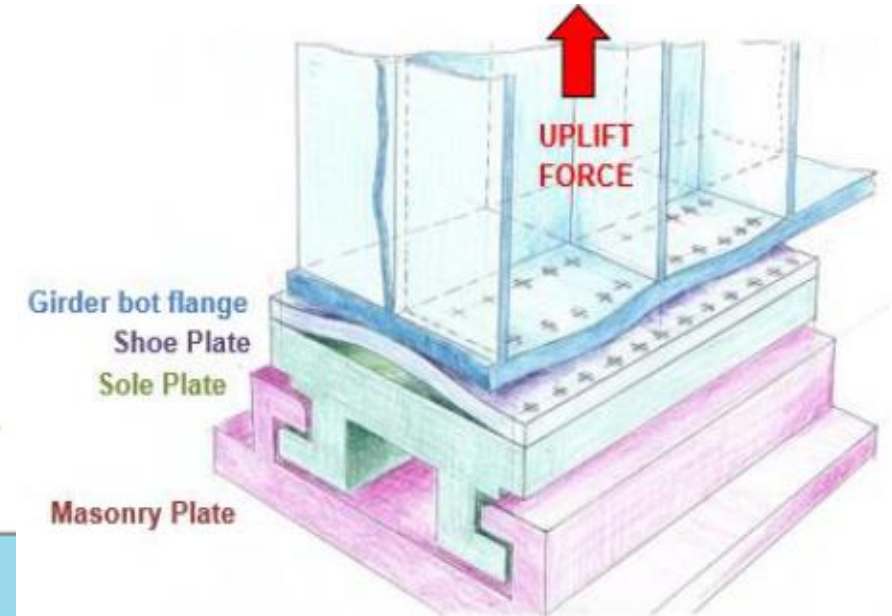
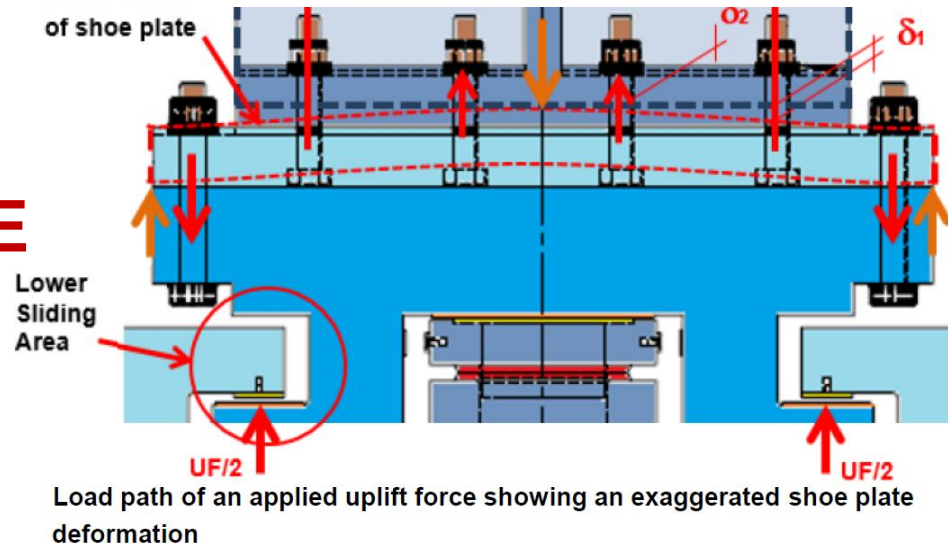


Photo of the Flange Connection Bolts During Construction

FATIGA DE BAJO CICLAJE EN BULONES DE ANCLAJE

Camino de cargas.

Posición deformada de la placa base
y el ala inferior de la viga de rigidez.
Inadecuada rigidez de la placa base
originó la distribución inadecuada de
cargas cíclicas de tracción.



The exaggerated deflected shape of the shoe plate and the girder bottom flange when subjected to an uplift load



The observed permanent deformation of the shoe plate immediately after the failure of the bearing

FATIGA DE BAJO CICLAJE EN BULONES DE ANCLAJE

Las cuatro filas de bulones de anclajes entre el ala inferior de la viga de rigidez y la placa base, sufrieron un progresivo proceso de fractura por las cargas de tracción cíclicas actuantes.



Fractured bolts (ASTM A490 bolt - connecting shoe plate to girder flange) and deformed shoe plate at north-west bearing. Note four lines of failed flange connection bolts.

LECCIONES APRENDIDAS

- La causa principal de la falla fue un **proceso de fractura progresivo** debido a **fatiga de bajo ciclaje** en el grupo de bulones de anclaje extremo.
- Los bulones de alta resistencia ASTM A490 fallaron a lo largo de varias semanas bajo un **proceso de tracción cíclica**. El diseño del anclaje fue incorrecto.
- Otros factores que han contribuido a la falla fueron la **acción de palanca** debido a la flexibilidad de la placa base que generó una **distribución inadecuada de tracción** sobre los bulones y **flexión, incorrecta instalación** de los bulones y del apoyo y la **muy baja temperatura** al momento del colapso (-16 °C)
- El grupo de bulones **falló bajo una tracción cíclica** significativamente **menor a la tracción máxima de diseño**.



LECCIONES APRENDIDAS

- ❑ Una vez más, un **proceso de fatiga** de acciones sensiblemente **menores a la máxima estática** de diseño, produce la falla.
- ❑ En este caso, otros **factores concomitantes** crearon una distribución no uniforme de cargas y un progresivo fallo del grupo de bulones, que finalizó con la falla total del anclaje y el **fuera de servicio del puente**.
- ❑ **Tracción cíclica en bulones y barras roscadas** (fatiga de alta o baja ciclicidad) fundamentalmente si son **elementos de fractura crítica**, es un factor crucial que requiere de **extremo cuidado en el diseño de detalles constructivos**.

PUENTE MARTIN OLAV SABO

CASO DE ESTUDIO

El 19 de febrero de 2012,
el puente atirantado
peatonal Martin Olav
Sabo, en Minneapolis,
USA, falló.



CAUSAS PRINCIPALES

Propagación por fatiga de fisuras iniciadas en los **diafragmas de anclaje** de los cables debido a fatiga inducida por vibración debido al viento.

CONSECUENCIAS

- No se registraron muertos ni heridos.
- Fuera de servicio, temporal.

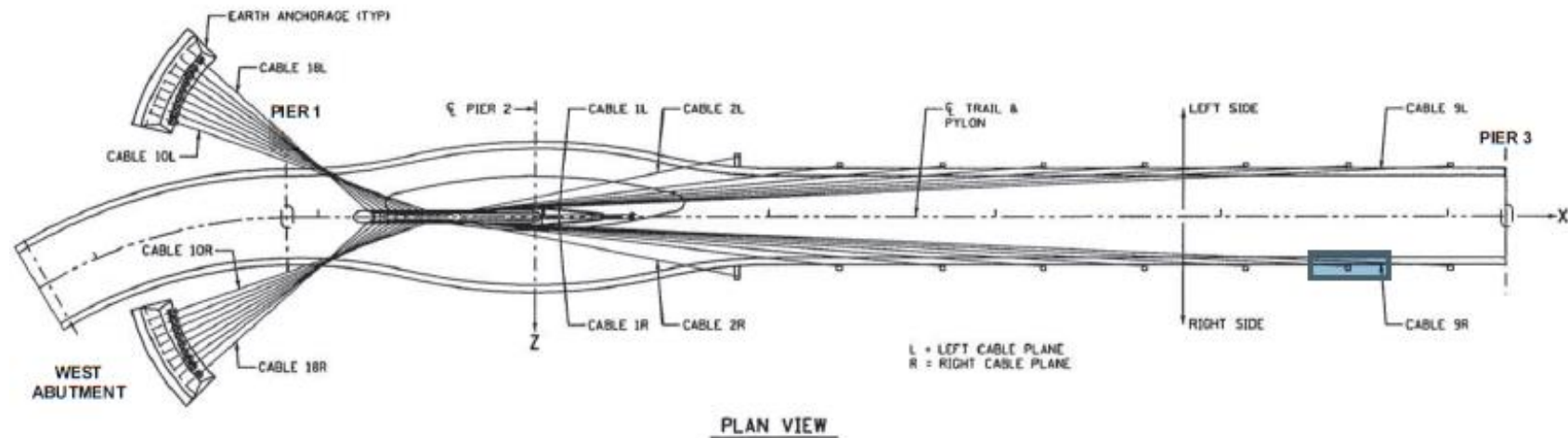
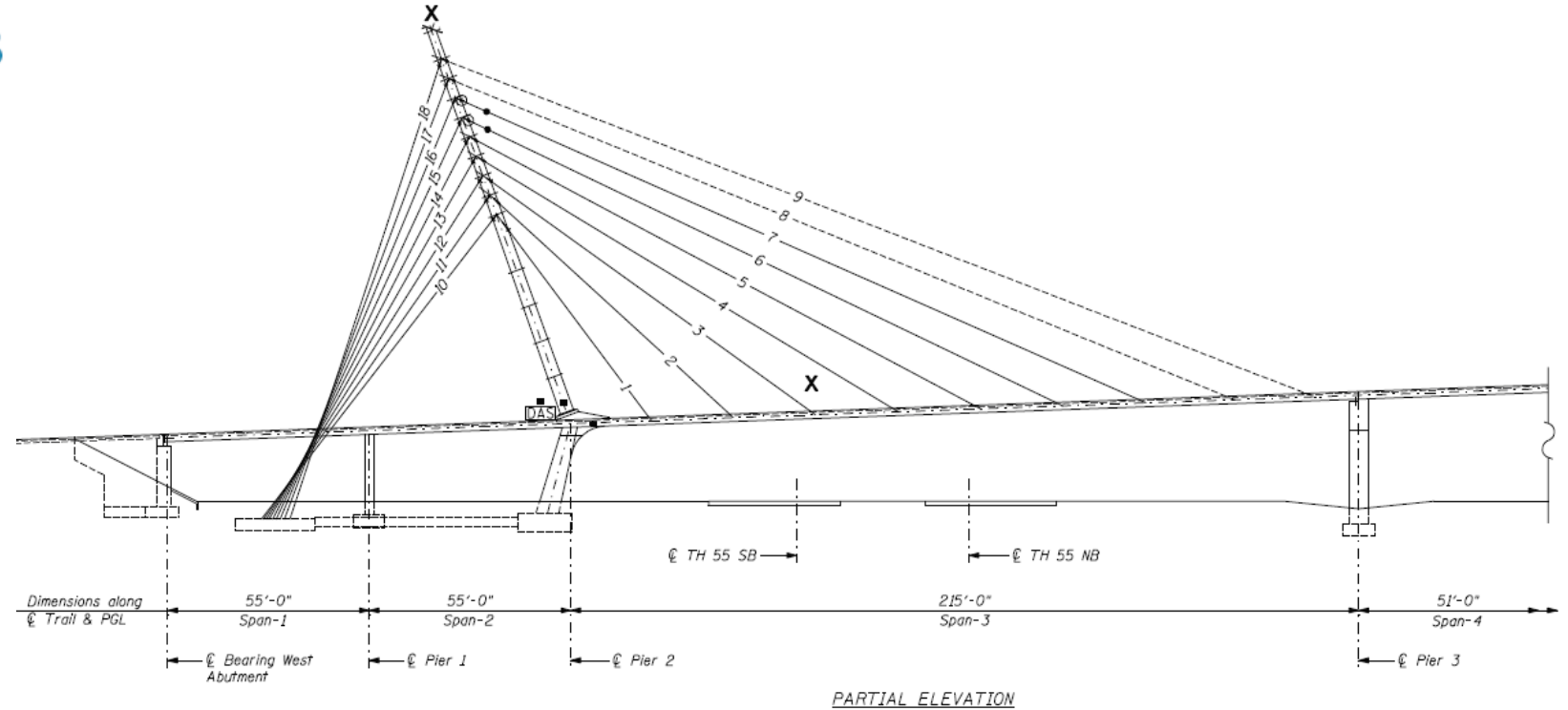


SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Puente atirantado
peatonal.

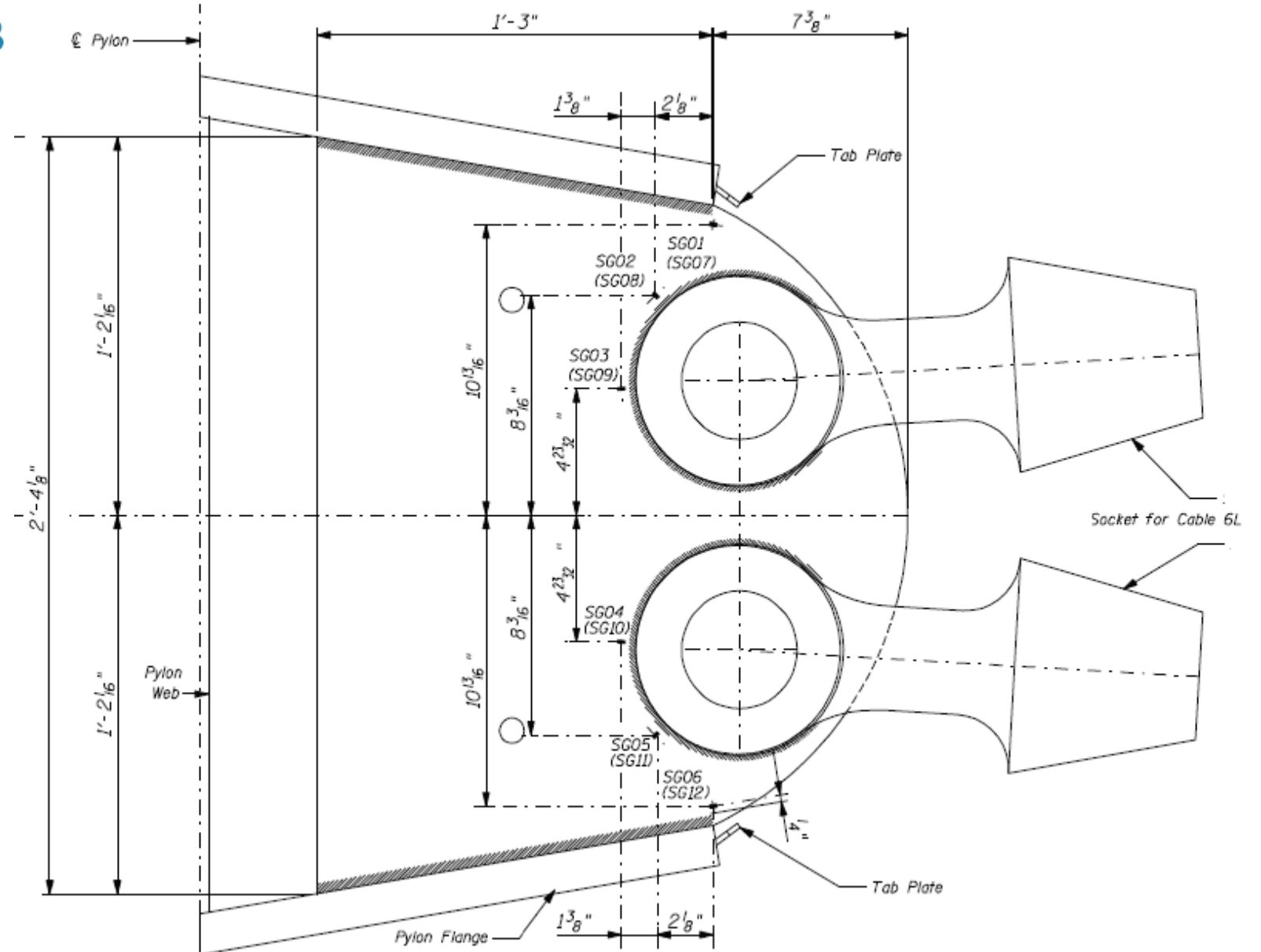
Tramo principal: 65.5 m

Estructura de acero
soldada.



DETALLE ESTRUCTURAL DONDE SE PRODUJO LA FALLA

Detalle de anclaje de los
cables de atirantamiento
al pilón.



DETALLE ESTRUCTURAL DONDE SE PRODUJO LA FALLA

Detalle de anclaje de los
cables de atirantamiento
al pilón y anclaje al suelo



Typical cable earth anchorages.



Typical cable anchorage at the pylon showing the cable diaphragm plate and clevis pin connection.

DETALLE ESTRUCTURAL DONDE SE PRODUJO LA FALLA

Fractura de las placas de
anclaje en las dos
localizaciones de falla.



View of Cable Diaphragm Plate 9 after fracture.



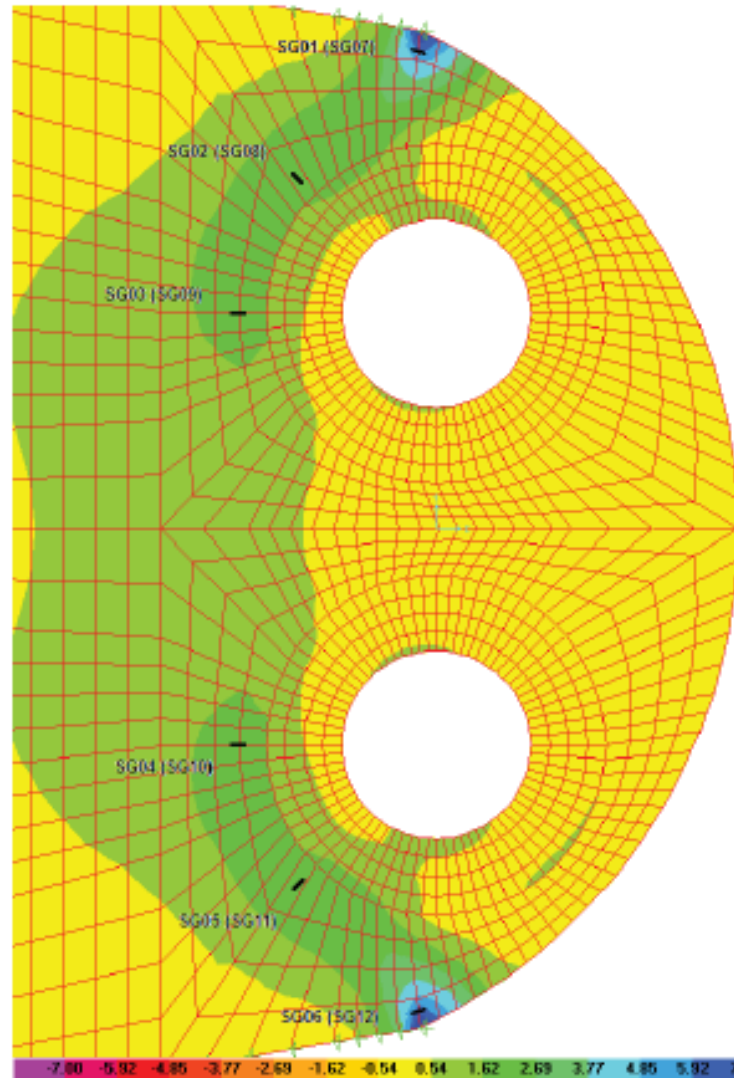
Segment of Cable Diaphragm Plate 9 that separated from the pylon following plate fracture.



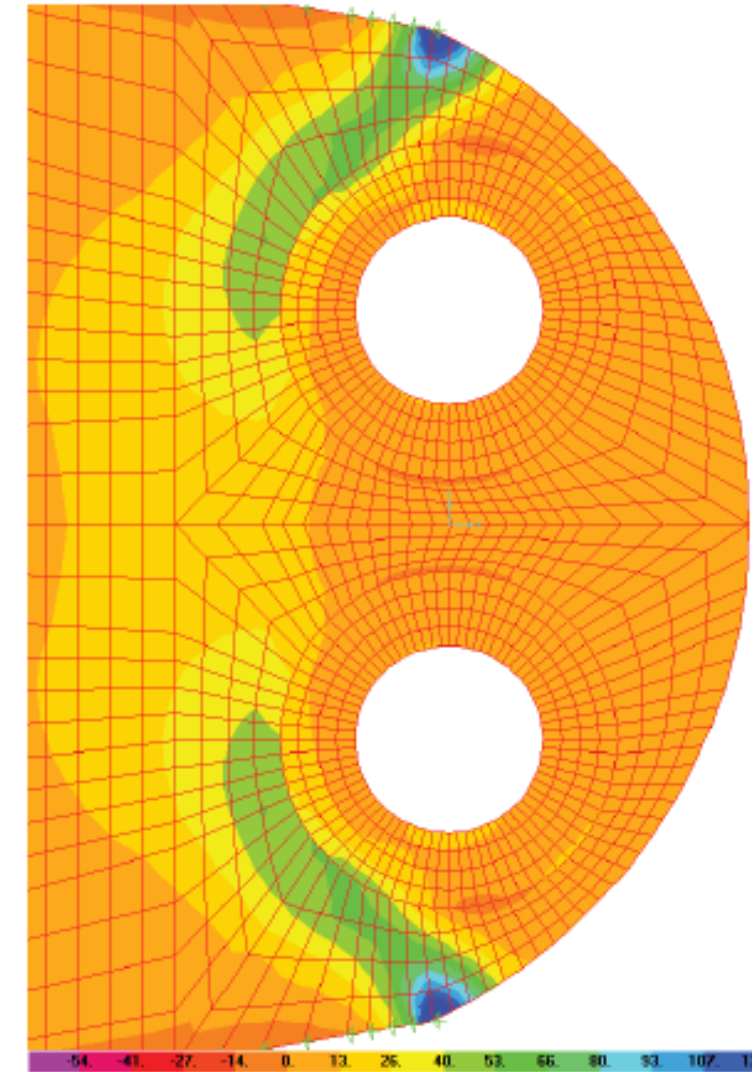
View of Cable Diaphragm Plate 8 following fracture and removal of Cables 8L and 8R.

MODELO DE ELEMENTO FINITOS DE LA PLACA DE ANCLAJE

Modelo de elementos finitos donde puede apreciarse la concentración de tensiones al final de la soldadura de filete de unión de la placa con el pilón debido a vibración inducida por la acción del viento y desalineación, lo cual generó la iniciación de la fisura.



Maximum bending stresses at diaphragm plate surface due to simulated wind-induced vibration.



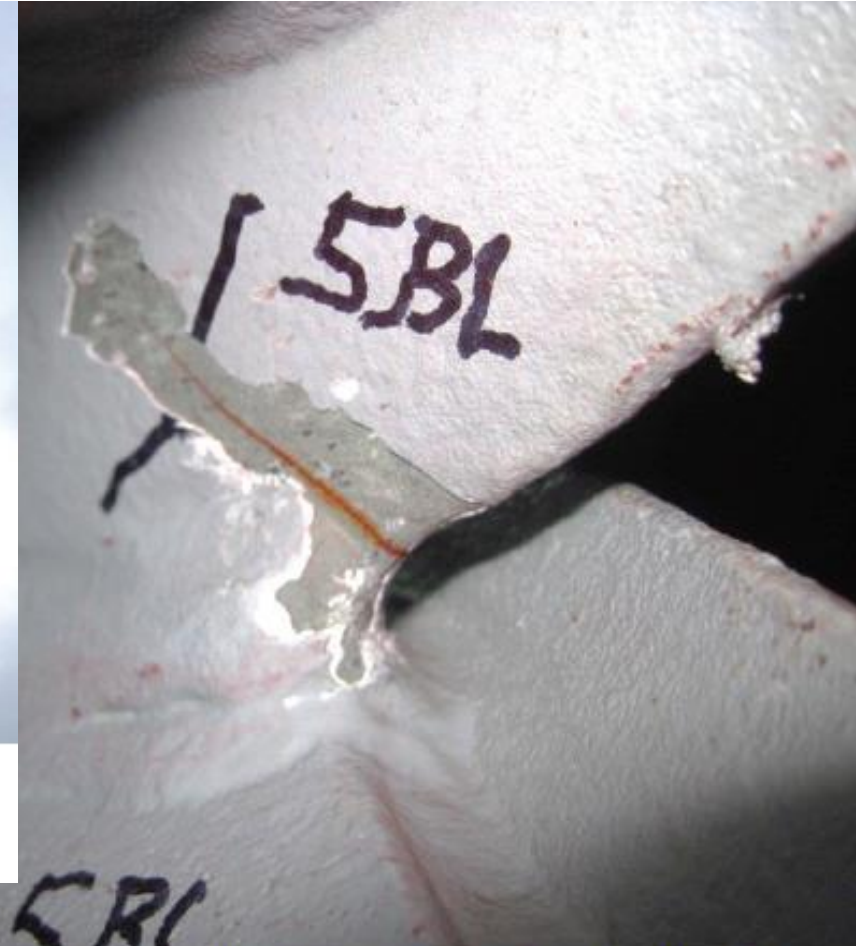
Bending stresses at diaphragm plate surface due to 4.5° misalignment.

ZONA DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE FISURAS

Proceso sistemático de fisuración iniciado en la soldadura de unión entre la placa de anclaje y el ala de la sección del pilón.



View of the left pylon flange alignment following local plastic rotation of the flange at the attachment elevation for Cable Diaphragm Plate 8.



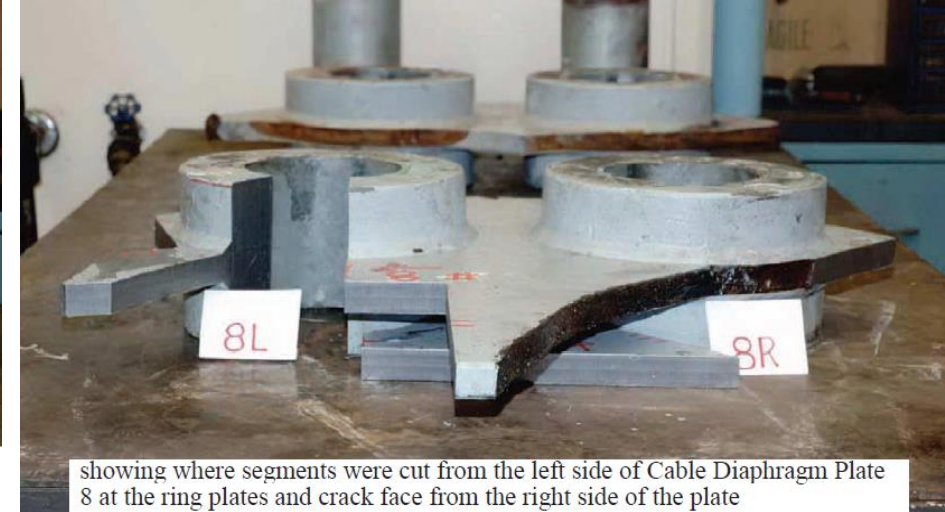
Crack located in the bottom surface of Cable Diaphragm Plate 5 at the left side diaphragm plate-to-pylon flange weld. The crack is approximately 1 1/2 inches long. It is shown highlighted by red MT powder after chipping the paint off.

SUPERFICIE DE FRACTURA

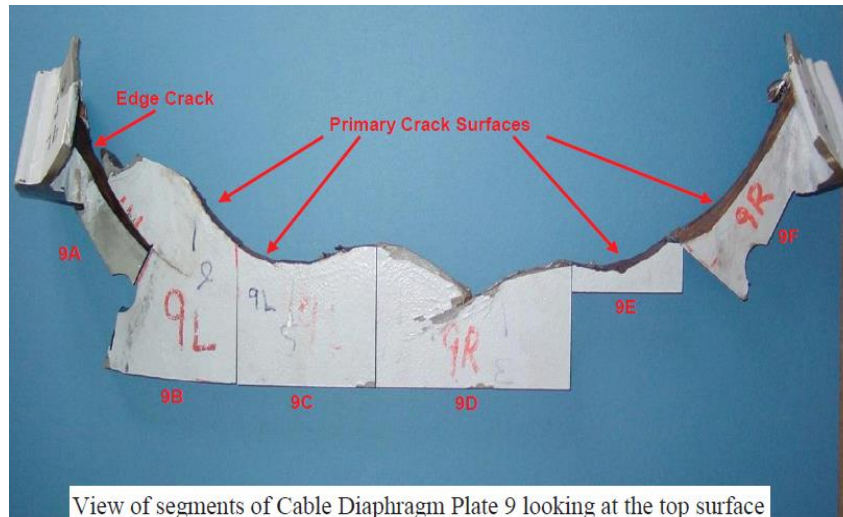
Las superficies de fractura demuestran, claramente, un proceso de propagación de fisuras por fatiga (superf. suave y brillante) hasta la falla frágil (superficie opaca y rugosa)



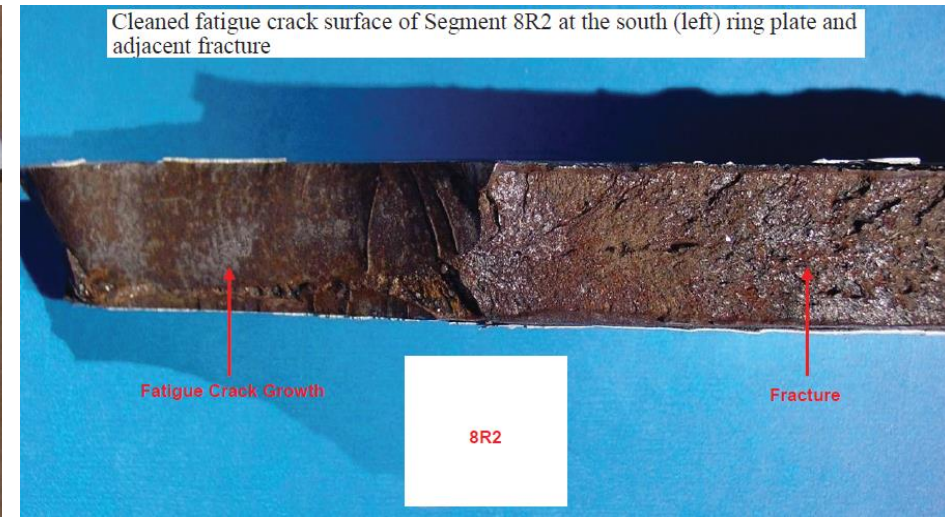
View of fracture surface of Cable Diaphragm Plate 9 showing crack growth from weld toes of ring plates and end welds



showing where segments were cut from the left side of Cable Diaphragm Plate 8 at the ring plates and crack face from the right side of the plate



View of segments of Cable Diaphragm Plate 9 looking at the top surface



Cleaned fatigue crack surface of Segment 8R2 at the south (left) ring plate and adjacent fracture

Fatigue Crack Growth

Fracture

8R2

LECCIONES APRENDIDAS

- La causa principal de la falla fue un **proceso de fatiga por vibración inducida por el viento** que derivó en la **fractura frágil** de dos placas de anclaje, de dos tirantes, con el pilón.
- La **terminación del pie de la soldadura de filete de la unión placa de anclaje – ala del pilón** es un **detalle de muy baja performance a fatiga**, calificación según AASHTO E y E', el cual posee un umbral de fatiga de, únicamente, 18 MPa
- Una vez más, un **proceso de fatiga** de en un **detalle crítico de baja performance a fatiga** produjo la falla estructural con **acciones sensiblemente menores a las de diseño**.
- La estructura **no colapsó** dado que **poseía redundancia estructural**. Factor clave.

LECCIONES APRENDIDAS

- ☐ En estructuras sometidas a **cargas cíclicas**, un “**pequeño**” **error** de **diseño** puede derivar en **fallos catastróficos** o **fuera de servicio**.
- ☐ **Puentes atirantados y suspendidos** son estructuras particularmente susceptibles a **efectos aeroelásticos producidos por viento** que pueden derivar en procesos de **fatiga inducida** o **inestabilidad aerodinámica**.

PUENTE I-35W MINNEAPOLIS

CASO DE ESTUDIO

El 1 de Agosto de 2007, el Puente de la vía interestatal I-35W Minneapolis, Minnesota, USA, colapsó en servicio.

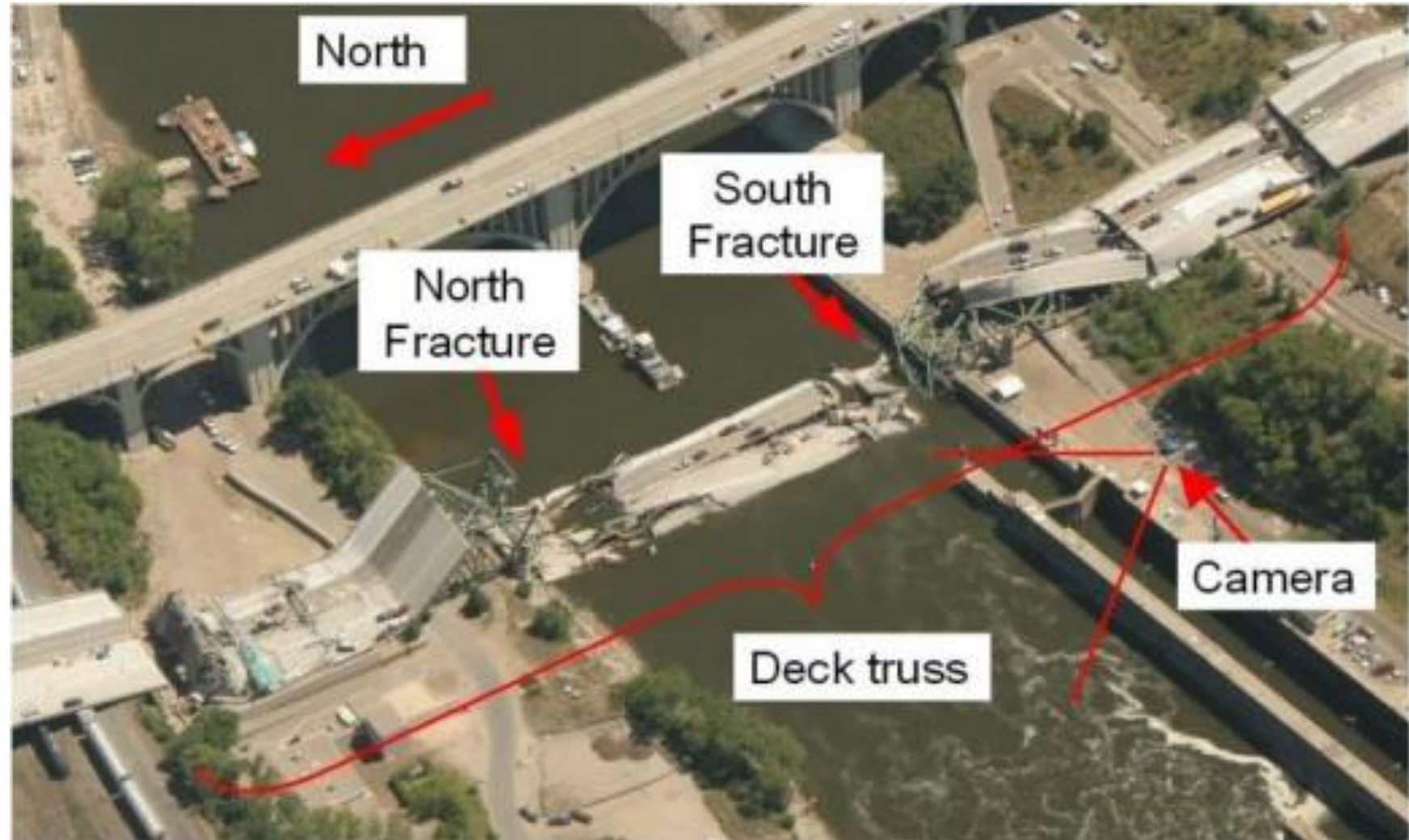


Figure 1. The collapsed deck truss portion of the I-35W bridge.

CAUSAS PRINCIPALES

- Errores de diseño.
- Inestabilidad por desplazamiento lateral de una chapa nodal.
- Falta de redundancia estructural.
- Inadecuadas tareas de inspección y mantenimiento.

CONSECUENCIAS

- 13 personas muertas.
- 145 personas heridas.

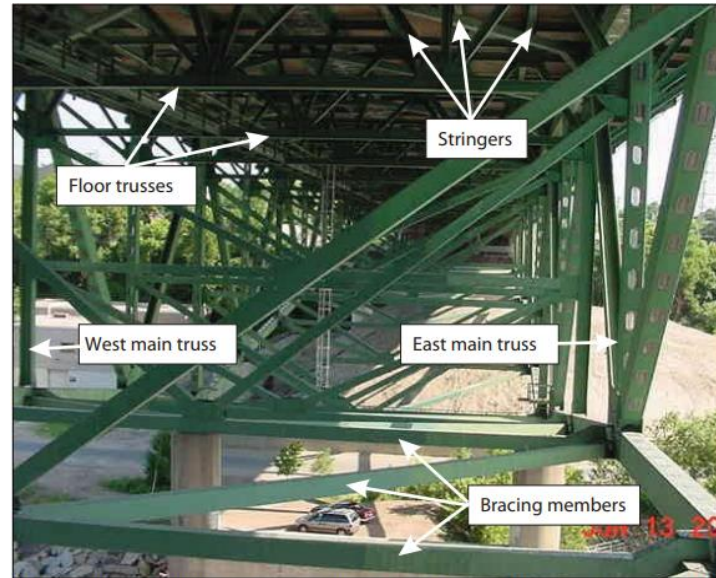


Figure 7. Interior structure of north portion of deck truss, looking north. (Source: URS Corporation)

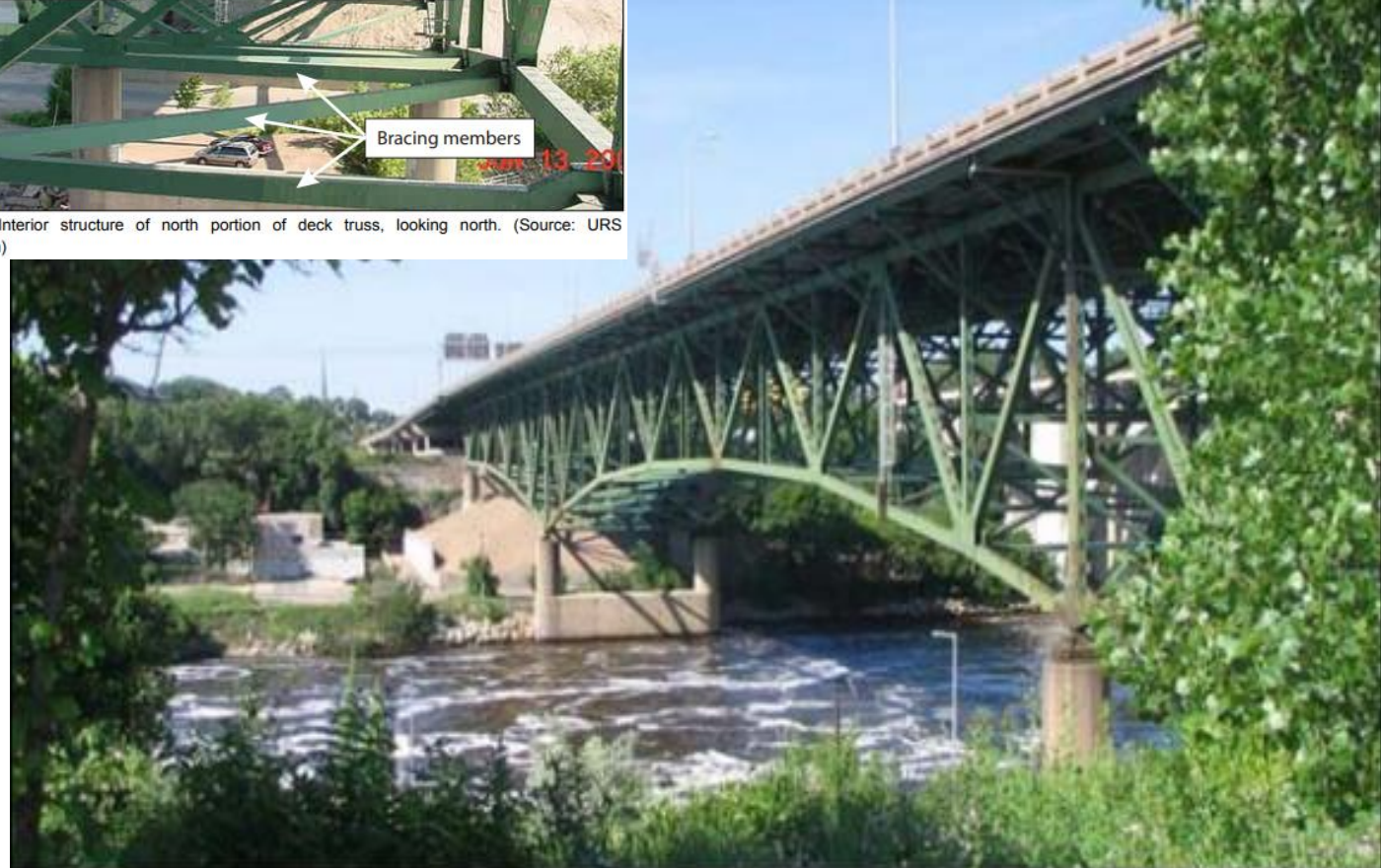


Figure 4. Center span of I-35W bridge, looking northeast. The center span is supported by pier 6 on the near (south) riverbank and pier 7 on the far (north) riverbank.

SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Estructura reticulada
de **acero** y con **tablero**
de **hormigón**. Sistema
continuo de tres
tramos. Longitud total:
372 m

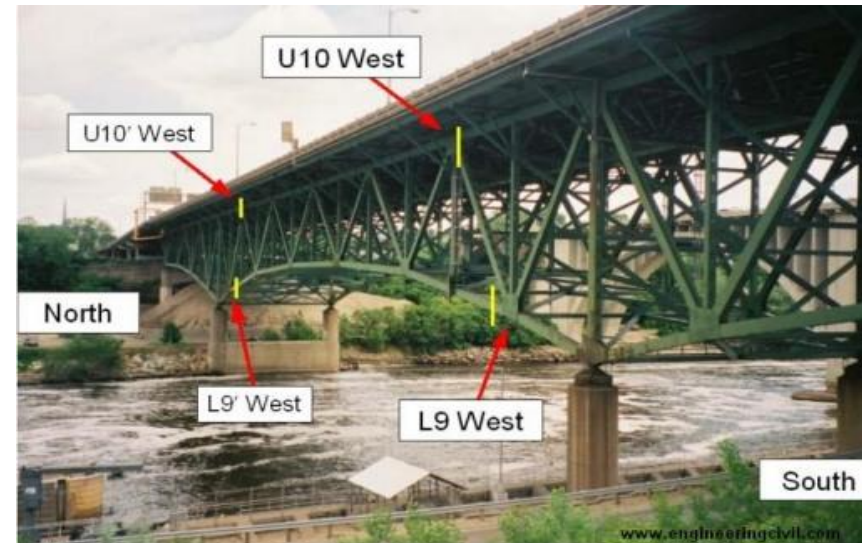
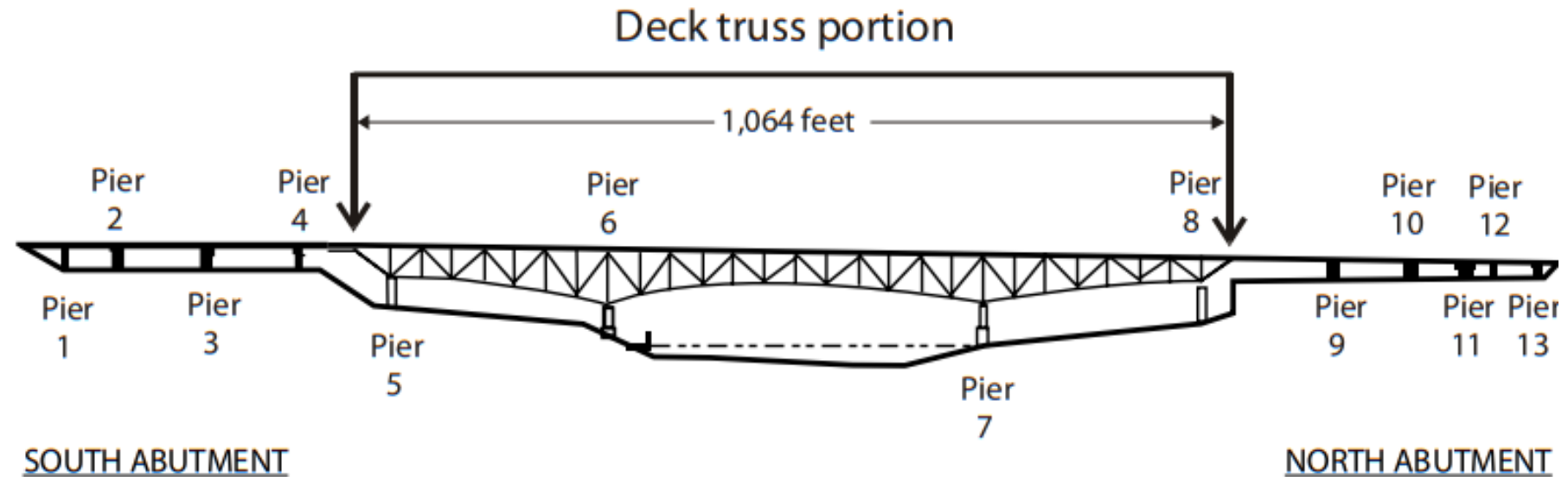


Figure 3. Identifying the L9, L9', U10 and U10' nodes on the west main truss.
Short yellow lines mark the fractures that separated the west truss.

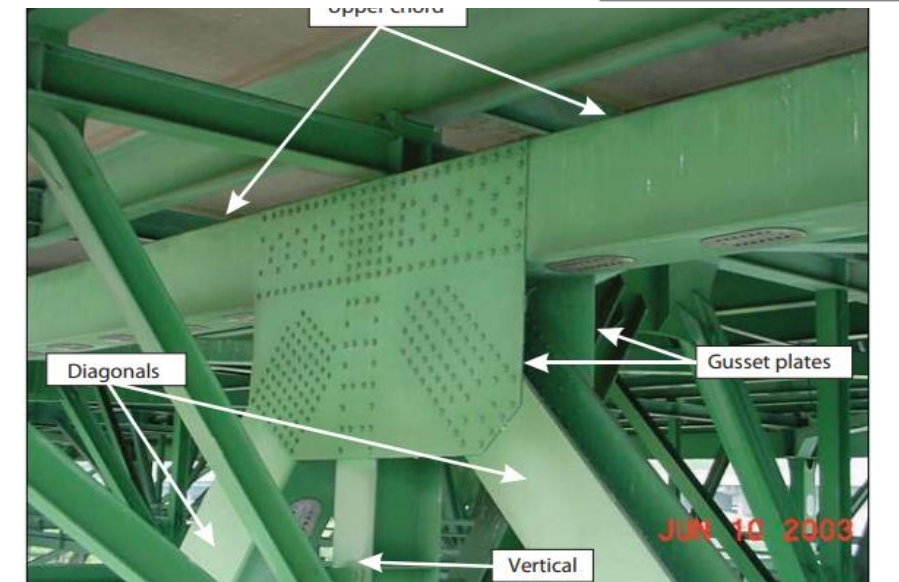


Figure 6. Typical five-member node (two upper chord members, one vertical member, and two diagonal members) on I-35W bridge. (Source: URS Corporation)

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA FALLA DE LA CHAPA NODAL

3- Cargas estimadas al
momento del colapso
(cargas concentradas por
tareas de mantenimiento).

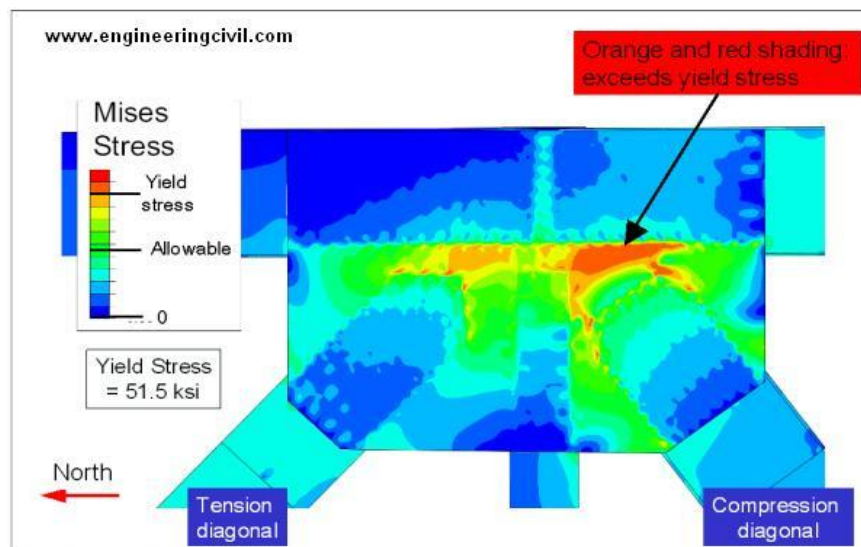


Figure 11. Mises stress contours under the dead load of the original 1967 bridge.

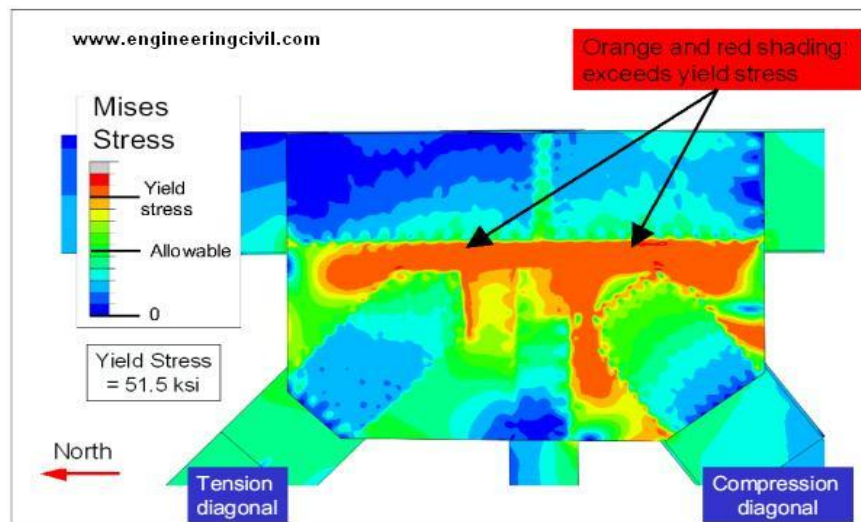


Figure 13. Mises stress contours under the estimated loads on the bridge at the time of the collapse.

1- Cargas permanentes
originales.

2- Cargas luego de las
modificaciones de 1977 y
1998 (repavimentación).

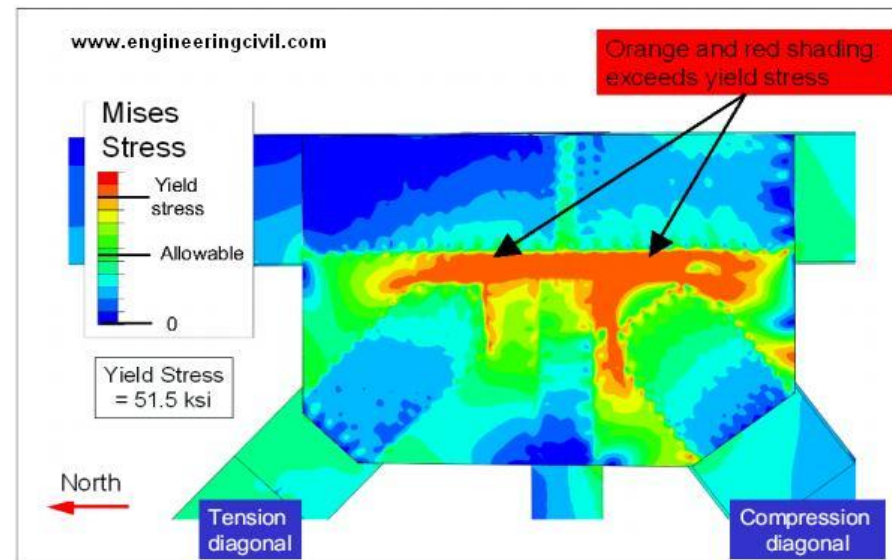


Figure 12. Mises stress contours after the 1977 and 1998 modifications.

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA FALLA DE LA CHAPA NODAL

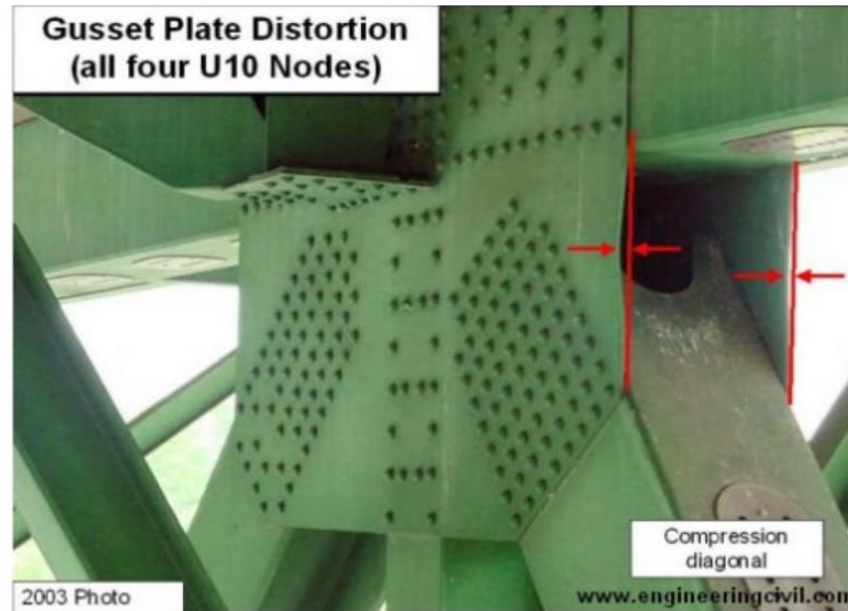


Figure 10. Gusset plate bowing distortion at one of the U10 nodes.

Puede apreciarse en la foto superior izq., la **deformación lateral de la chapa de nudo**, detectada durante una inspección previa al colapso.

El análisis mediante elementos finitos demuestra, claramente, la deformación lateral de la chapa nodal.

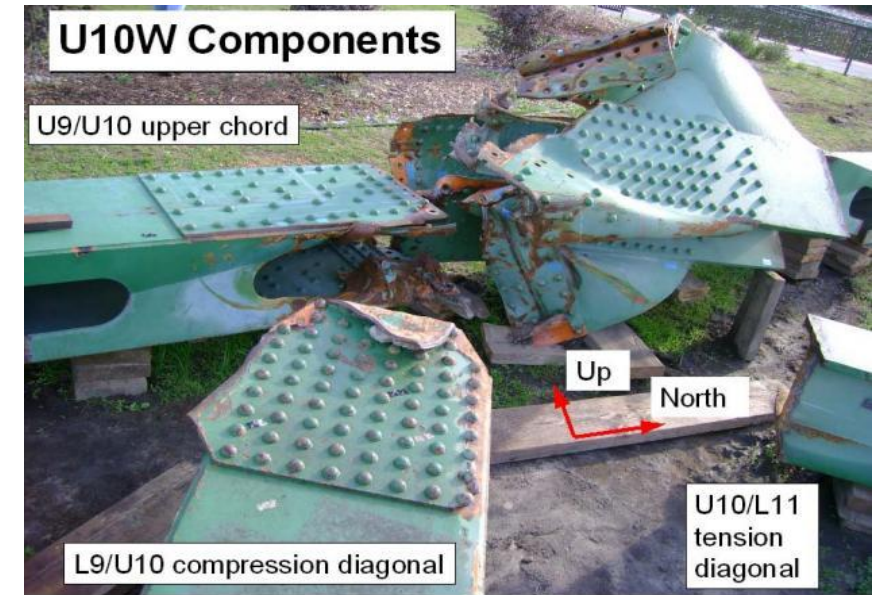


Figure 4. Reconstructed U10W components, looking at the east gusset plate.
www.engineeringcivil.com

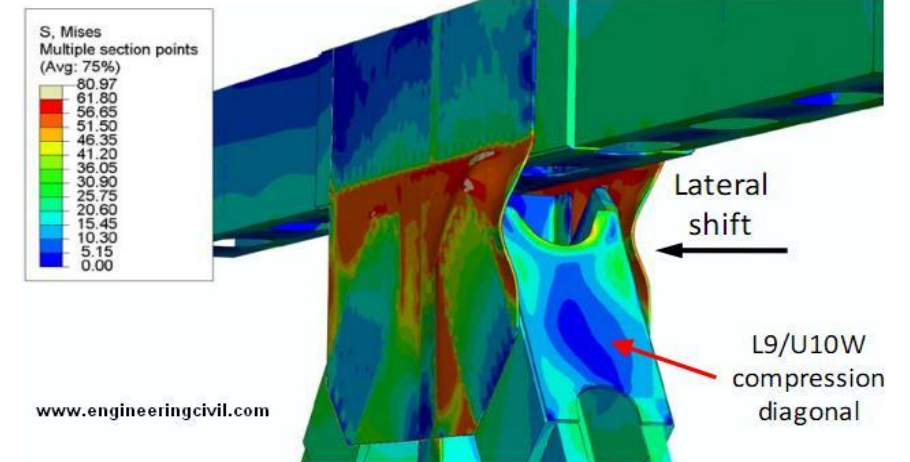


Figure 14. Indicating the lateral shift of the L9/U10W diagonal, with Mises stress contours.

SOBRECARGAS EXTRAORDINA RIAS

Cargas concentradas
de equipos y
agregados por tareas
de mantenimiento, el
día del colapso.

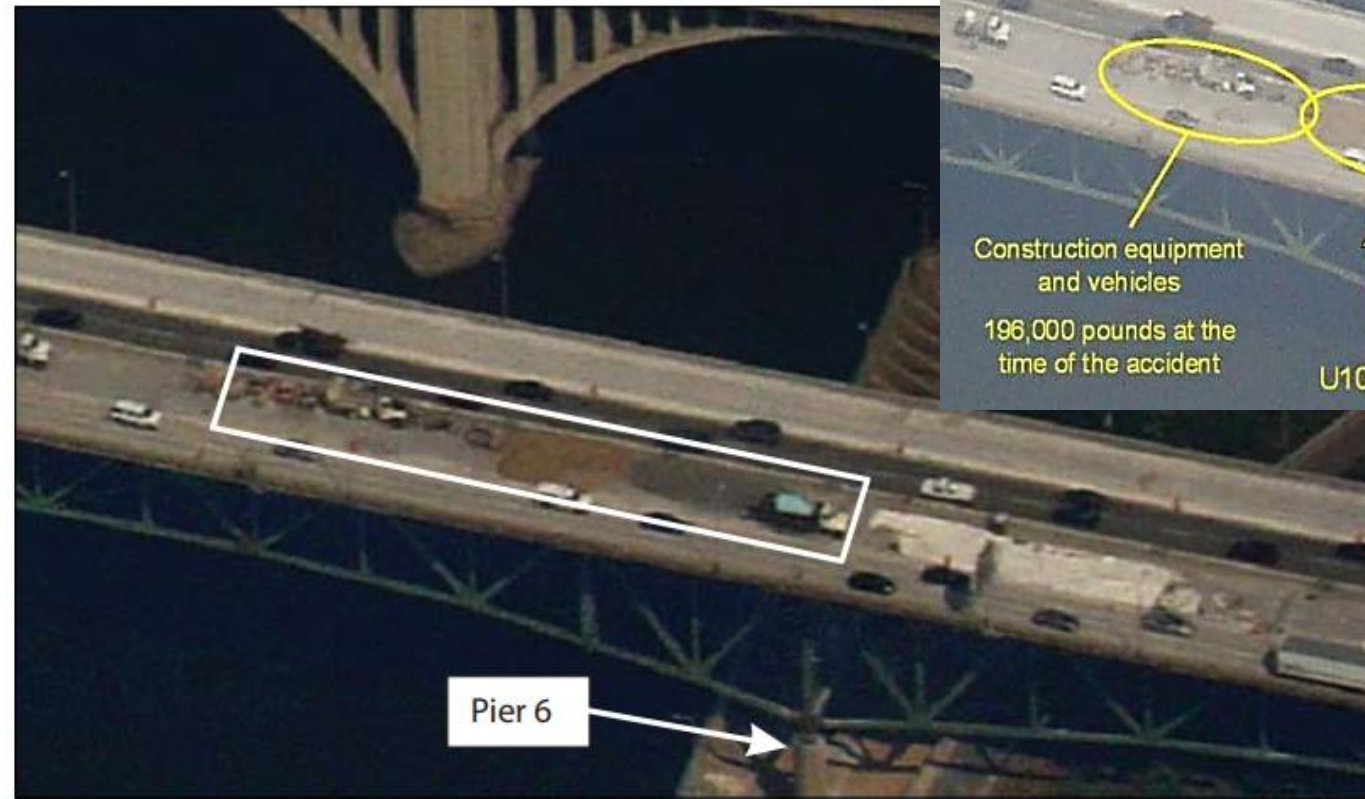


Figure 16. Construction equipment and aggregates (indicated by white box) stockpiled on southbound lanes of bridge about 2 hours 15 minutes before collapse. (This figure is an enlargement of a section of a photograph taken by a passenger in a commercial airliner departing Minneapolis/ St. Paul International Airport.)

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL COLAPSO

Fisuración por **fatiga** fue, también,
encontrada en chapas nodales.

NTSB:

**Deformación lateral inestable de
chapa nodal. Diseño incorrecto del
espesor de la chapa nodal.**

**Inexistencia de trayectoria
redundante de cargas (redistrib.).**

In the fracture area just north of pier 6, it was found that all four of the gusset plates at a node were fractured due to fatigue cracking and overload. This eventually led to a cleavage fracture.

The fracture pattern from one of the gusset plates is shown in figure 7. Upon fracture, two diagonal members and two upper chord horizontal members separated from the rest of the members at the node location. The loss of structural support due to this separation caused structural deformation to begin in the deck truss south of this location. This led to a chain-reaction of overloading by either compression or tension, thus causing several structural members to fracture as well.

The National Transportation Safety Board (NTSB) concluded that the initial event causing the collapse was a lateral shifting instability of the upper end of a diagonal member in the southern portion of the center span. Another conclusion reached was that the failed gusset plates where the collapse initiated were inadequate to support the structure as the bridge was originally designed, let alone modifications and renovations that were made. This inadequacy was attributed to an error by the design firm that was not caught by government inspectors and other forms of design checks, even though they had several opportunities. NTSB also concluded that the total collapse of the deck truss was likely once the gusset plates failed since the deck truss portion was designed to be “non-load-path-redundant.”³⁹



LECCIONES APRENDIDAS

- La **causa principal** del colapso fue la **inestabilidad por deformación lateral de una chapa nodal** debido al incorrecto diseño de su espesor.
- **Nodos y uniones** son calificadas como **elementos de fractura crítica** independientemente de que sean zonas o uniones de compresión.
- **Hechos adicionales** ocurrieron durante la vida útil de servicio (repavimentación) y particularmente en el día del colapso (cargas concentradas) que contribuyeron a la falla, pero la causa principal del colapso fue el inapropiado diseño del espesor de dicha chapa nodal.
- **Falta de redundancia estructural.** Falta de trayectoria alternativa o redistribución de cargas.
- **Falla en la revisión de ingeniería** por parte de terceros.



LECCIONES APRENDIDAS

- **Inadecuadas tareas de inspección** y mantenimiento. Inadecuada atención a las distorsiones o abombamientos de chapas nodales durante inspecciones.
- Si bien no fue la causa del colapso, se detectaron muchas **fisuras por fatiga** durante los trabajos de inspección, previo al colapso.
- La **redundancia estructural** (camino alternativo de cargas, elementos múltiples, hiperestaticidad), es un **criterio esencial de diseño**.
- En general, **nudos y uniones** son **elementos de fractura crítica** por lo que deben ser especialmente **inspeccionados** durante la vida útil de un puente.

PUENTE PEATONAL FIU - MIAMI

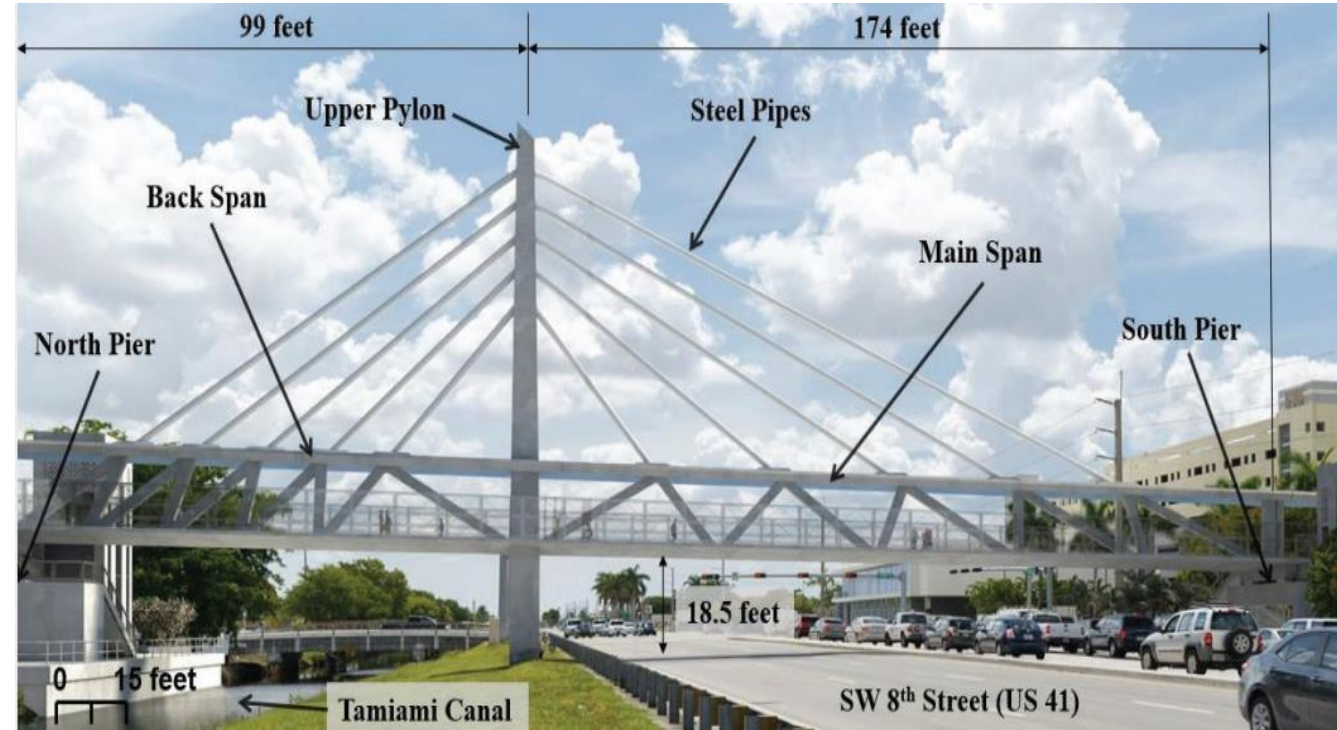
CASO DE ESTUDIO

El 15 de marzo de 2018,
el puente peatonal de la
Universidad de Florida
FIU, USA colapsó
durante trabajos de
montaje



CAUSAS PRINCIPALES

- Análisis estructural deficiente de los etapas de construcción
- Subestimación de la demanda y sobrestimación de la capacidad a corte de una junta fría crítica.
- Falla en la correcta ponderación de la gravedad del estado de fisuración previo al colapso (fisuras 40 veces más anchas que las normativamente admisibles)
- Falla en los controles por pares de la ingeniería de diseño y construcción.



CONSECUENCIAS

- 6 personas muertas.
 - 10 personas heridas.
- “Errors in bridge design, inadequate peer review and poor engineering judgment led to the collapse of this bridge.”**

-- NTSB Chairman Robert Sumwalt

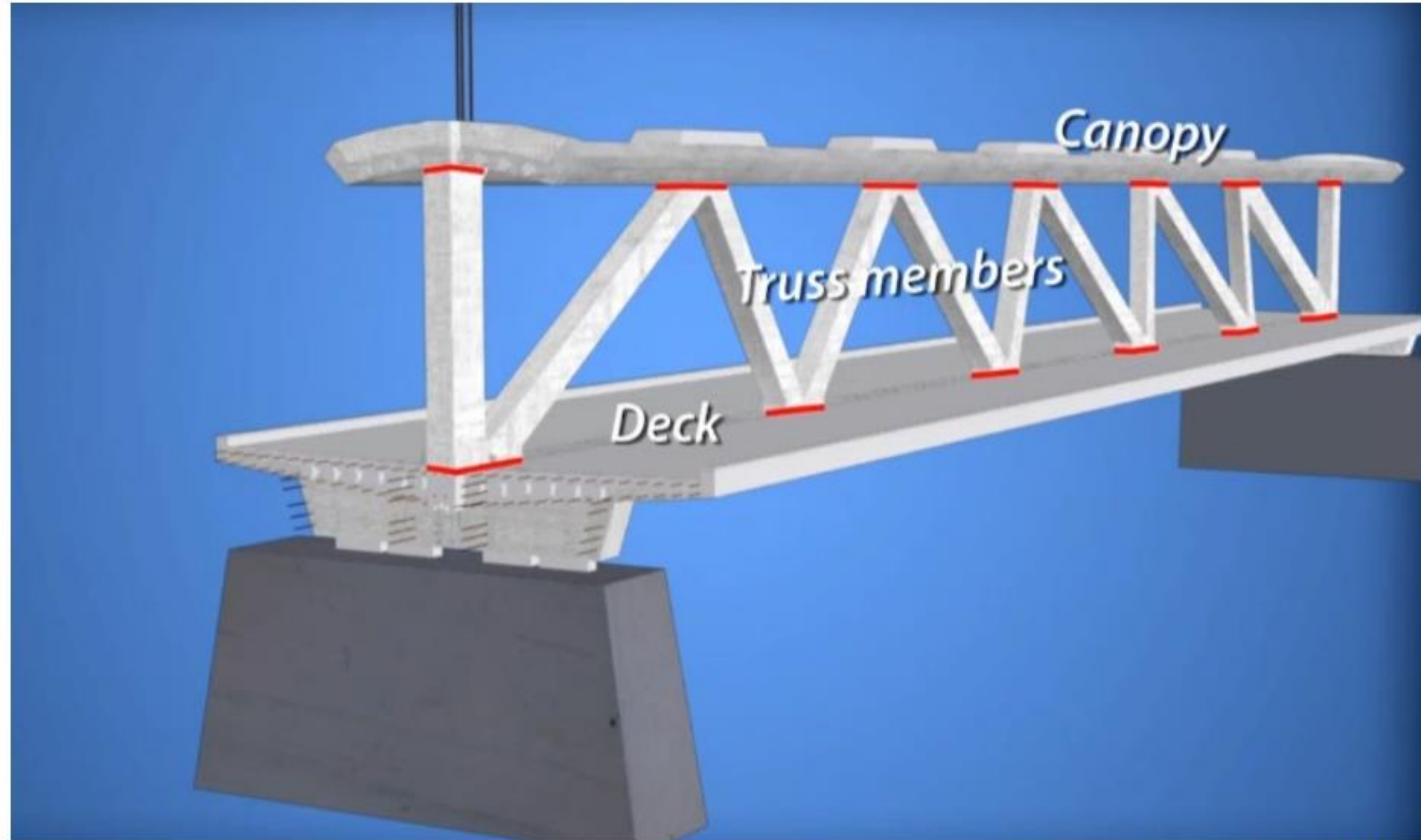
SISTEMA ESTRUCTURAL PRINCIPAL

Sistema estructural del tramo principal durante los trabajos de montaje.

Luz del tramo: 53 m

**Inusual sistema
reticulado de concreto
postesado.**

Cold-joint locations (separate concrete cast)

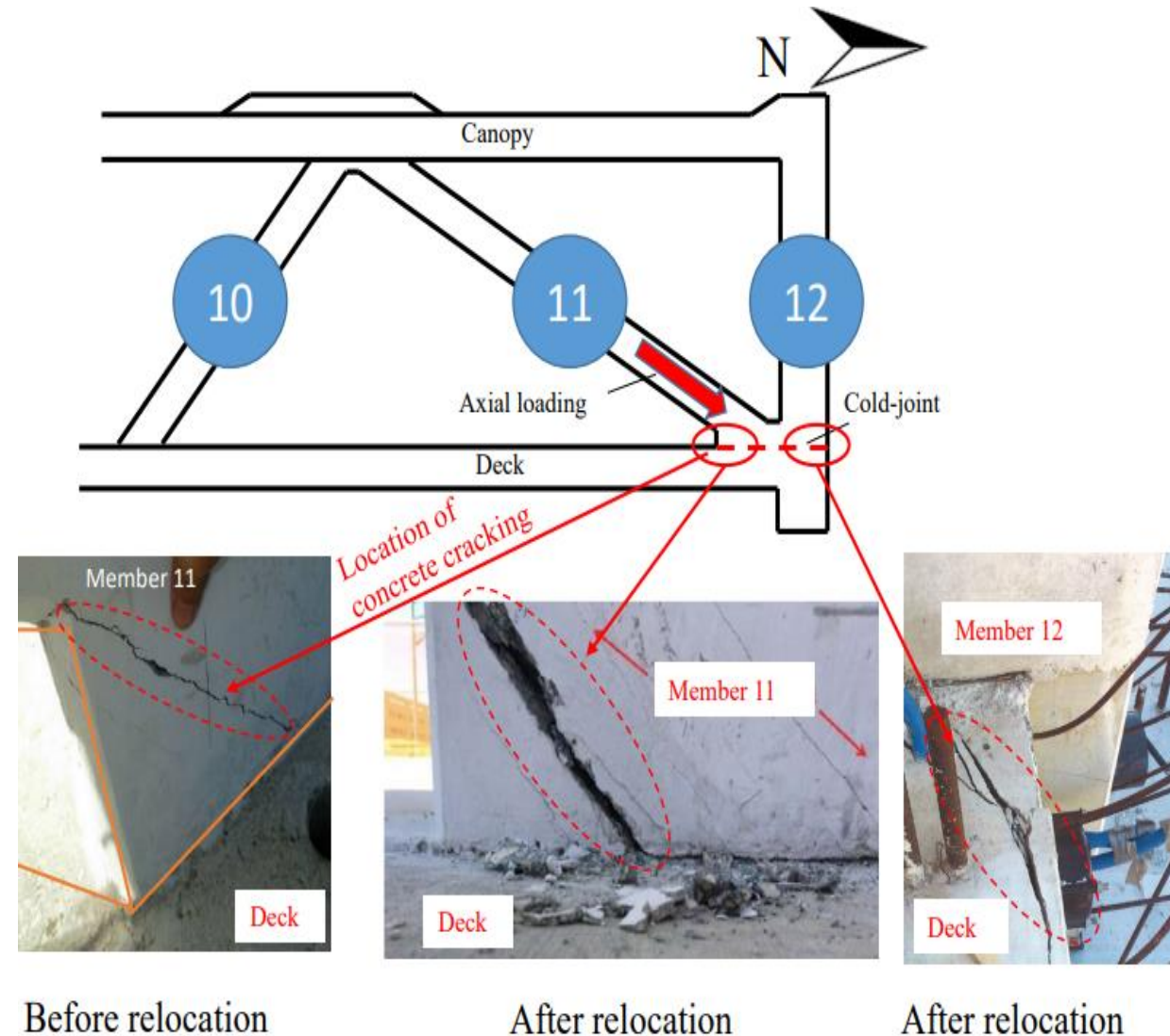


FISURAS DETECTADAS

Las partes del puente fueron ensambladas cerca de la localización definitiva y luego transportadas al lugar definitivo (ABC Accelerated Bridge Construction).

Estado de fisuración de gran importancia, previo y posterior a la relocalización de la estructura.

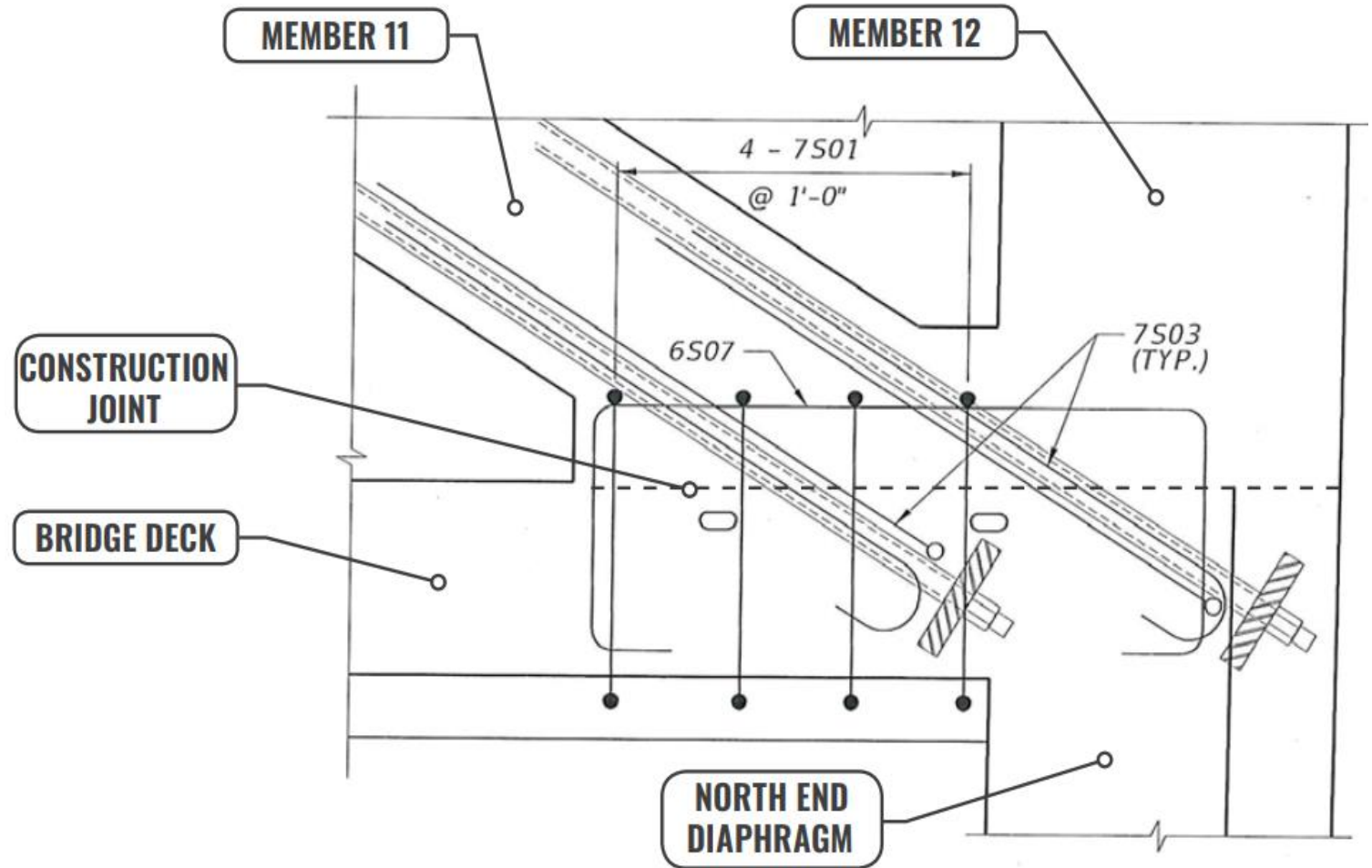
Con el fin de “cerrar” las fisuras detectadas, se decidió **re-tensionar la diagonal 11** incrementando, indeseablemente, la acción horizontal (corte) en el nodo 11/12. El colapso ocurrió durante dichas tareas. **Decisión fatal.**



Truss member 11/12 connection to deck detail from RFC plan Sheet B-61.

JUNTA CRÍTICA

Armadura de refuerzo de corte en la interface junta fría (junta de construcción),
La necesaria rugosidad superficial intencional en las juntas frías no fue indicada en los planos constructivos.



TRUSS MEMBERS 11 & 12
CONNECTION DETAIL

DETALLES CONSTRUCTIVOS INCONVENIENTES

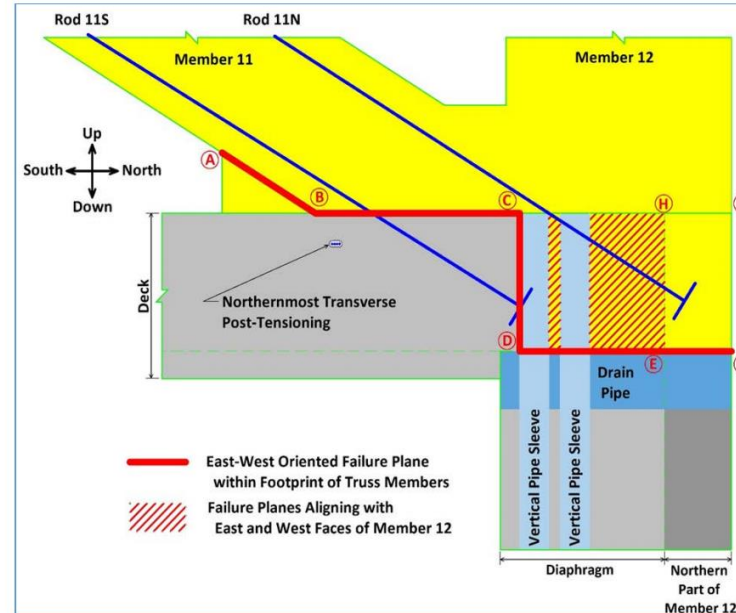


Figure 32. Midline cross section of member 11/12 nodal region, with annotations indicating resistance mechanisms and distress. (Source: FHWA 2019)

Fisuración que demuestra infradimensionamiento.
Conductos de drenaje también contribuyeron a la disminución de la Resistencia de la sección de falla.

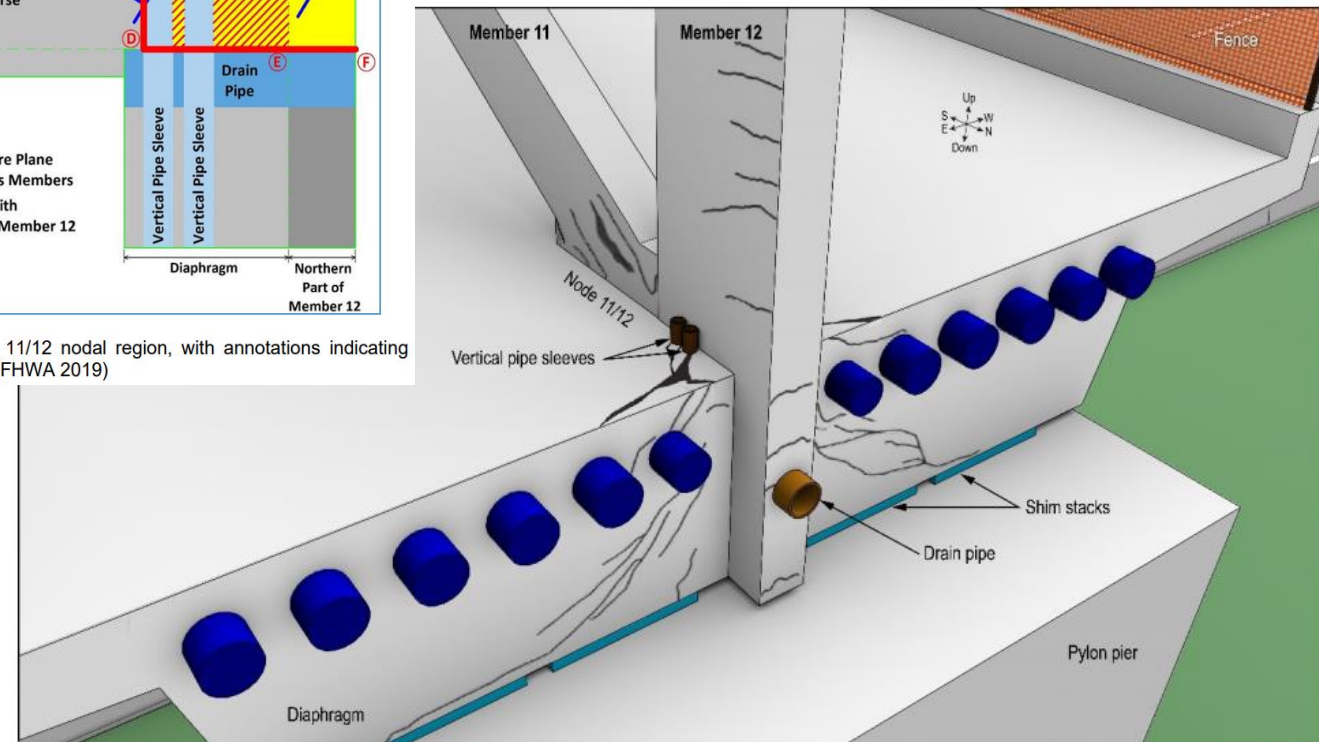


Figure 34. South and east view of extent of cracking at member 11/12 nodal region, deck, and diaphragm, indicating structural distress.

ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

La carga axial sobre la diagonal 11 cambia durante los distintos estados de construcción, entre tracción a compresión.

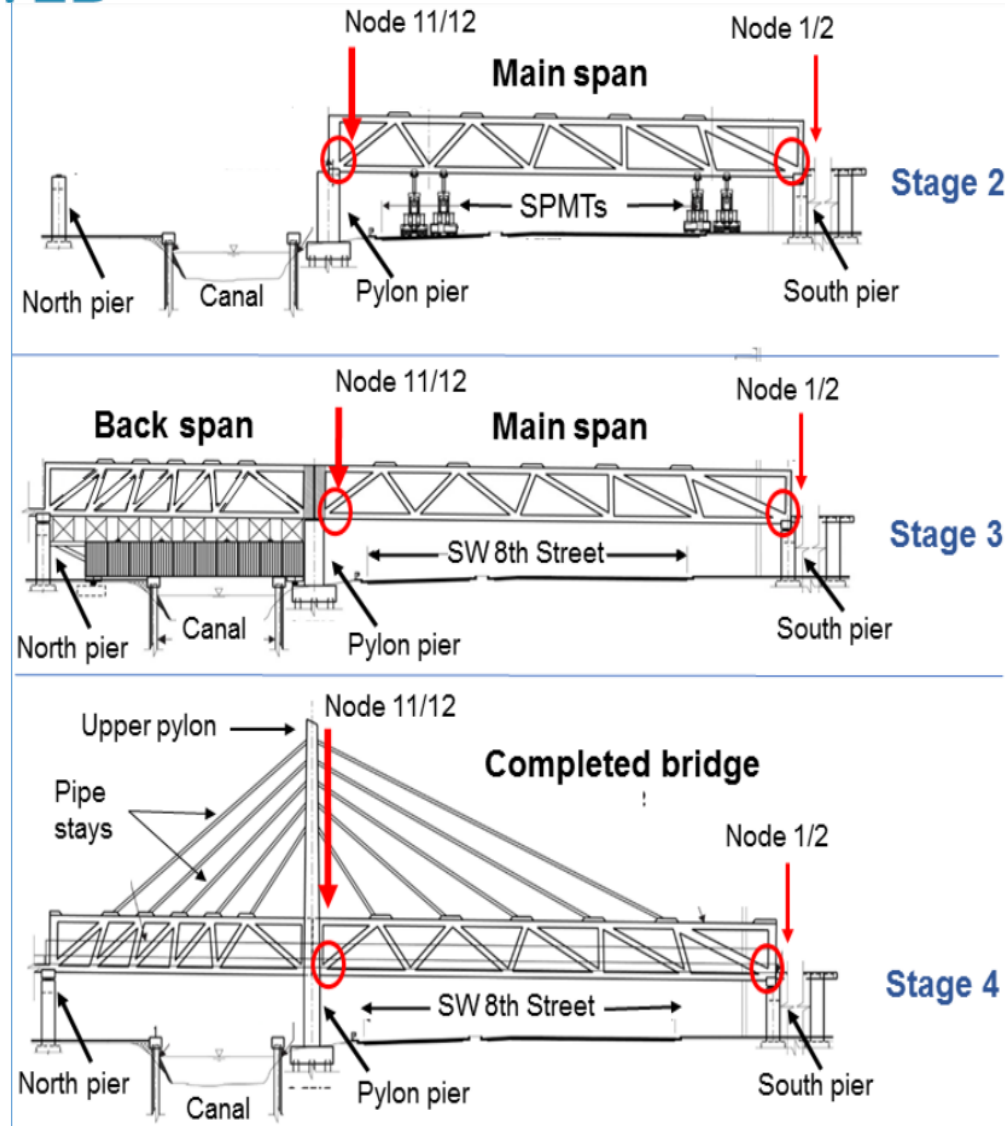


Figure 13. Construction stages 2–4, east view. (Source: FIGG, annotated by NTSB)

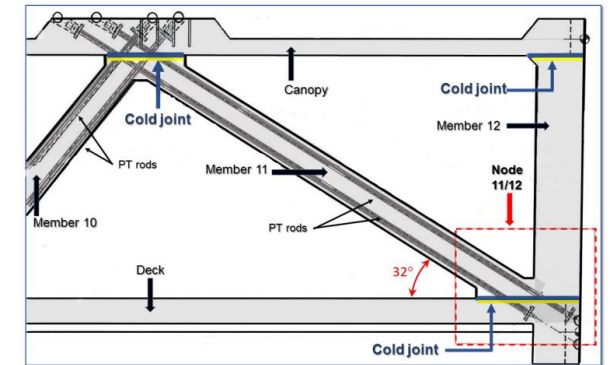


Figure 14. Cold joints on pedestrian bridge main span north end, at intersection of members 10, 11, and 12 at canopy and at node 11/12 connection to deck at pylon pier. [Note: View is looking west]

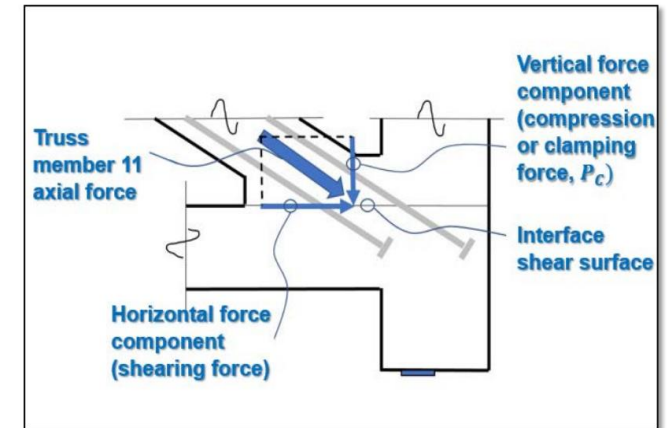
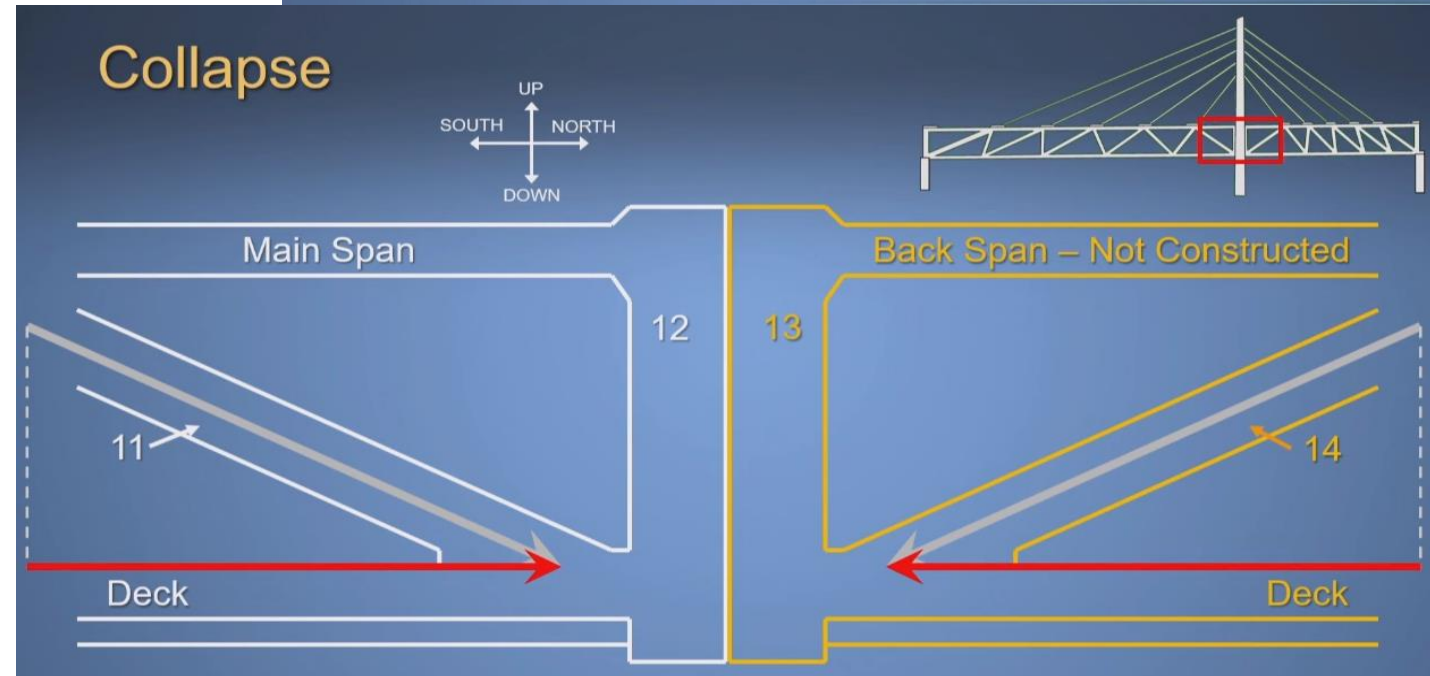
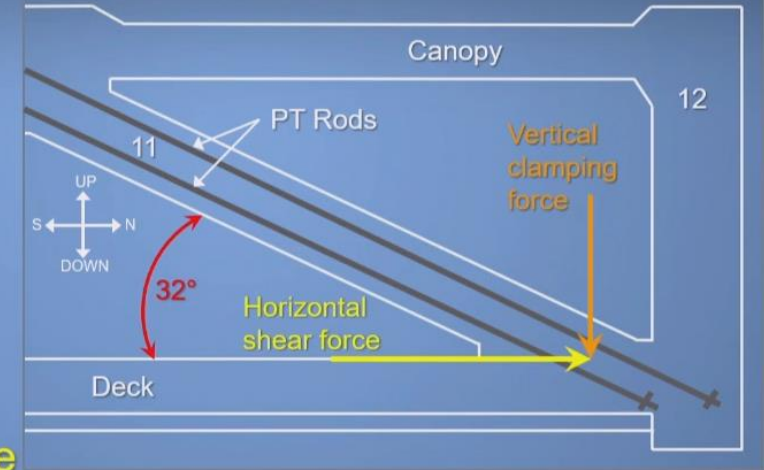


Figure 29. Depiction of axial force from truss member 11 on nodal region interface shear surface. (Source: FHWA 2019)

COMPONENTE HORIZ. DURANTE EL RETESADO

En la etapa de construcción 3 (en la cual ocurrió el colapso) una **importante componente horizontal** generada por el retesado, no puede ser aun **contrarrestada** y generó la falla en la junta fría del nudo 11/12

- Post-tensioning purposes
 - Counteracted tensile forces during move
 - Vertical clamping force (beneficial)
 - Horizontal shearing force (detrimental)
- 32-degree angle of member 11 relative to deck
- **Magnitude of horizontal force 60% larger than vertical force**





LECCIONES APRENDIDAS

- Como es usual, las **causas del colapso fueron múltiples**.
- **Errores de diseño** importantes, particularmente en la subestimación de la demanda a corte y la sobrestimación de la capacidad resistente a corte de las juntas frías críticas.
- **Fallas en la correcta ponderación de las riesgosas fisuras** detectadas previo al colapso (40 veces más anchas de lo admisible).
- Con el fin de “cerrar” las fisuras detectadas, se **decidió re-tensionar la diagonal 11 incrementando, indeseablemente, la acción horizontal** (corte) en el nodo 11/12. El colapso ocurrió durante dichas tareas. **Decisión fatal.**



LECCIONES APRENDIDAS

- Falta de redundancia estructural.
- Falla en la revisión por pares.
- Si bien aparente obvio, es de remarcar que **el correcto y profundo análisis estructural durante las distintas etapas de construcción es tan importante como la evaluación en el estado de servicio**. Este hecho es particularmente importante en el método acelerado de construcción de puentes (ABC method).
- Un **correcto y competente control por pares** es de **fundamental importancia** en la práctica de la ingeniería estructural.

CONCLUSIONES SOBRE LAS LECCIONES APRENDIDAS

Del análisis de estos y otros colapsos y fallas estructurales ocurridos a lo largo de la historia y alrededor de todo el mundo, pueden obtenerse algunas conclusiones generales y de cierta sistematicidad:

- Las **causas de las fallas estructurales** suelen poseer un **motivo preponderante** pero en general **no único**, existiendo **factores concomitantes** que llevan, en su acción conjunta, a que una estructura falle, en tanto que ante la ausencia de uno de ellos probablemente la estructura no hubiese fallado.
- **Problemas de comunicación entre las partes** que conforman el equipo de diseño, construcción y revisión, fundamentalmente en tareas cuyas responsabilidades no se encuentran concretamente determinadas y/o claras (“tierras de nadie”).

CONCLUSIONES SOBRE LAS LECCIONES APRENDIDAS

- **Problemas en los métodos de montaje con acciones temporales**, sin un análisis estructural profundo. Asimismo, en estructuras auxiliares de construcción (p. ej. andamios, torres de montaje, apuntalamientos, etc.).
- **Falla en lo planes de control de calidad y revisión** por parte de terceros independientes.
- **Errores en el diseño de detalles constructivos**, los cuales poseen una fundamental preponderancia en la confiabilidad estructural durante la vida de servicio de una estructura e inclusive durante su construcción.
- **Falta de redundancia estructural**, es un factor crucial y recurrente en los fallos y colapsos ocurridos.
- **Inadecuados o inexistentes procesos de inspección y mantenimiento.**



CONCLUSIONES SOBRE LAS LECCIONES APRENDIDAS

Finalmente, el **análisis** de las **causas de fallas estructurales** deja enseñanzas **invaluables** que permiten la **mejor comprensión** del **comportamiento de las estructuras** y con ello posibilitan el desarrollo y mejoras en los reglamentos y “reglas del arte”, relacionados con las tareas de diseño, construcción y mantenimiento de estructuras.



CICLO DE
SEMINARIOS WEB

GRACIAS POR SU ATENCIÓN