

**REPORTE ÚNICO DE RESULTADOS DE
ANÁLISIS CAUSA-RAÍZ
FASE III**

VERSIÓN EN ESPAÑOL

DNV

DICTAMEN TÉCNICO DEL INCIDENTE OCURRIDO EN LA LÍNEA 12, EN EL TRAMO ELEVADO ENTRE LAS ESTACIONES OLIVOS Y TEZONCO, ENTRE LAS COLUMNAS 12 Y 13, Y ANÁLISIS DE CAUSA-RAÍZ

REPORTE ÚNICO ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CAUSA RAÍZ (ACR)

CLIENTE: Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México

Reporte No.: T1148816-2021-SGIRPC-ACR-DFIII-L12 REV. 0

Rev.	Descripción	Fecha	Cargo	Nombre	Firma
0	Dictamen Final	23 Diciembre 2021	Project Sponsor	Eckhard Hinrichsen	
0	Dictamen Final	23 Diciembre 2021	Gerente de Proyecto	Milagro González	
0	Dictamen Final	23 Diciembre 2021	Coordinador de Proyecto	Enone Cao	

Enone Cao
 Puntos Traductor
 de Inglés autorizada por
 el Tribunal Superior de
 Justicia de Hidalgo
 Registro:
 FIC-2020-435A Luna
 800001

DNV

Project name: Dictamen Técnico Del Incidente
Ocurrido En La Línea 12, En El
Tramo Elevado Entre Las
Estaciones Olivos Y Tezonco,
Entre Las Columnas 12 Y 13, Y
Análisis De Causa-Raíz

Report title: Dictamen Final – Fase III
Customer: Secretaría de Gestión Integral de
Riesgos y Protección Civil de la
Ciudad de México

Date of issue: 27 Septiembre 2021

Project No.: T1148816

Organisation E-CU-X

unit:

Report No.: Rev. 0

Applicable contract(s) governing the provision of this Report:

Objetivo:

Por favor refiérase al Resumen Ejecutivo.

DNV Energy Systems
México S. de R.L. de
C.V.

Av. Insurgentes Sur
859-Piso 7, Nápoles,
Benito Juárez, 03810

Ciudad de México,
CDMX

Tel: 55 8526 8900

Cristina del Carmen
Punto Traductor
de Inglés autorizado por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:
SG-2020-435A
Flores García Luna



Preparado por	Verificado por	Aprobado por
Eckhard Hinrichsen, M.Sc., PMP Country Manager México	Matt Rogers, P.E., G.E. Principal Geotechnical Engineer	Lucy Craig, Ph.D. Director, Growth, Innovation & Digitalization
Nicolas Peralta, Ph.D., P.E. Senior Structural Engineer	Inge Lotsberg, Dr. Ing. Specialist Engineer	Hans Axel Bratfos, M.Sc. Global Service Area Leader
Thomas Jahnke, Dipl.-Ing. Senior Principal Structural Engineer	Mario Sæfferud, M.Sc. Principal Engineer – Materials Advisory	
Eric Nlambakwa, P.E., G.E. Principal Geotechnical Engineer		
Jorge Aldegunde, M.Sc. Railway Global Technical Manager		
Gustavo Godínez-Martínez, B. Ing., MBA Senior Principal Assessor – Engineer Assurance Services		
Enone Cao, M.Sc. Marine Service Engineer		
Milagro Trinidad Gonzalez Santiago, B. Ing. Head of Section – Market, Risk and Power Grids		

Copyright © DNV 2021. Todos los derechos reservados. Excepto cuando se acuerde por escrito: (i) Esta publicación o sus partes no pueden ser copiadas, reproducidas o transmitidas en ninguna forma, o por ningún medio, sea digital o de otro tipo; (ii) El cliente deberá mantener la confidencialidad del contenido de esta publicación; (iii) Ningún tercero podrá basarse en su contenido; y (iv) DNV no asume deber legal de cuidado respecto a ningún tercero. Se prohíbe la referencia a partes de esta publicación que conlleve a su mala interpretación. Descargos de responsabilidad adicionales se incluyen en el anexo G.

Distribución en DNV:

- ABIERTO. Distribución sin restricción, interna y externa.
- INTERNO solamente. Documento Interno de DNV.
- CONFIDENCIAL. Distribución dentro de DNV conforme al contrato aplicable.
- SECRETO. Sólo acceso autorizado.

*Especificar distribución:

0 2021-10-29 Primera Emisión

Palabras Clave:

[Keywords]

Cristina del Carmen
Perito Traductor
de Inglés autorizado por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:
SG-2020-435A
Flores García Luna
000003

Resumen Ejecutivo

DNV GL México, S. de R.L. de C.V. (DNV) fue contratado por la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC) del Gobierno de la Ciudad de México (GCM) para realizar un Análisis de Causas de Raíz (Fase 3) del Accidente en la Línea 12 (L12). El nombre oficial del proyecto es "**SERVICIO DE DICTAMEN TÉCNICO DEL SINIESTRO OCURRIDO EN LA LÍNEA 12, EN EL TRAMO ELEVADO ENTRE LAS ESTACIONES OLIVOS Y TEZONCO, ENTRE LAS COLUMNAS 12 Y 13, Y ANÁLISIS DE CAUSA-RAÍZ**". El Accidente en la Línea 12 ocurrió el 3 de mayo de 2021 aproximadamente a las 22:11 Hora del Centro (CT por sus siglas en inglés), donde una porción de la sección elevada de la Línea 12 entre las estaciones de Olivos y San Lorenzo Tezonco colapsó entre las Columna 12 y 13. El proyecto comprendió tres fases: Fase 1, opinión técnica preliminar; Fase 2, investigación de causas inmediatas (también referido como investigación de fallas); y Fase 3, el Análisis de Causa de Raíz (ACR). El objetivo de la opinión técnica de tercera parte (Fase 1) fue recolectar y preservar la evidencia para las fases subsecuentes de la investigación, al igual que reunir las observaciones iniciales. El objetivo del análisis de causas inmediatas (Fase 2) fue determinar la causa material o modo de falla del componente(s) asociado con el Accidente en la L12. El objetivo de la Fase 3 es determinar las causas de raíz técnicas del Accidente en la L12. Las causas de raíz están asociadas con controles, sistemas, prácticas y procedimientos (es decir, las barreras) que fallaron al prevenir que una amenaza (es decir, la causa inmediata) escalara para volverse un evento mayor (es decir, el Accidente en la L12).

Los hallazgos y conclusiones que aquí se presentan se basan en los datos e información recibidos o adquiridos hasta el momento en el que se emite el reporte. DNV se reserva el derecho de modificar o complementar dichos hallazgos y conclusiones en caso de que surja nueva información.

La Línea 12, "La Línea Dorada," que opera al sur y sureste de la Ciudad de México, México, tiene 23.722 km de longitud y es operada por el Sistema de Transporte Colectivo (STC). La línea está formada por una sección de túnel (de la Interestación Sur Mixcoac-Insurgentes a la Interestación Mexicaltzingo-Atlalilco) y una sección elevada (puente elevado) (de la interestación Tlatenco-Zapotitlán a la interestación Culhuacán-Atlalilco). La sección del puente elevado es de 11.253 kilómetros (km) de longitud y contiene dos tipos de estructuras de soporte de obra de ingeniería civil que dan soporte a los sistemas de vías y al material rodante (coches del metro, vehículos de mantenimiento, etc.). Estos tipos de estructura incluyen:

- **Vigas de concreto precolado** (4.5375 km) y
- **Sistema de vigas compuesto** – vigas de acero unidas a un tablero de concreto usando pernos (6.717 km).

Estas vigas brindan soporte a los sistemas de vías y al material rodante, y a su vez están soportadas por una subestructura subyacente que incluye cabezales de concreto y pilares de concreto. La sección del puente elevado que colapsó tenía 30 metros de longitud y estaba diseñada y fabricada como un sistema de vigas compuesto. En un sistema compuesto, la interacción entre las vigas de acero y el tablero de concreto de la parte superior es asegurada por pernos metálicos soldados al patrón superior de las vigas de acero. Dichos pernos transfieren fuerzas de corte entre el tablero de concreto y las vigas de acero.

Registro de la Secretaría de Justicia de Hidalgo

SG-2020-435A

DNV

acero para lograr una acción compuesta efectiva que ofrezca una capacidad estructural que es mucho mayor a la que se tendría en ausencia de la acción compuesta.

Como parte del esfuerzo de la Fase 2 del proyecto antes mencionado, DNV identificó las causas inmediatas del Accidente en la L12. Los resultados del análisis de causas inmediatas indicaron que el colapso ocurrió como resultado del pandeo de las Vigas Norte y Sur facilitada por la falta de pernos funcionales a lo largo de una longitud significativa de las vigas lo que ocasionó que una porción del puente elevado perdiera su estructura compuesta. De este modo, la estructura compuesta estaba operando como elementos independientes, una plataforma de concreto y una viga de acero, que experimentaban condiciones de carga para las que no estaban diseñadas para acomodar. Esto creó condiciones que llevaron a la distorsión del marco transversal central y al inicio y propagación de grietas por fatiga que posteriormente redujeron la capacidad de carga de la estructura. Los factores que contribuyeron a la falta de pernos que fueran funcionales incluyeron pernos con soldadura deficiente, pernos faltantes, y pernos mal colocados. Los posibles factores contribuyentes al colapso incluyeron deficiencias en las propiedades mecánicas de las vigas y en el diseño del marco transversal que no cumplieron con los estándares de diseño aplicables de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, por sus siglas en inglés)), específicamente sobre el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés) de la AASHTO en su Especificación para el Diseño de Puentes.

DNV desarrolló modelos computacionales del tramo elevado para evaluar el comportamiento estructural contra los escenarios y diferentes cargas requeridas por los códigos y estándares de la industria, así como las condiciones más probables que llevaron al colapso. DNV usó los softwares de Elementos Finitos SAP2000 y ANSYS, para evaluar la estructura "como se diseñó" (as-designed) y las condiciones del colapso en la estructura "como se construyó" (as-built), los detalles están integrados en el Anexo D.

A través de análisis adicionales, realizados como parte del reporte de la Fase 3, se determinó que la pérdida de integridad en la estructura compuesta fue resultado de un modo de falla dependiente del tiempo, seguido de un evento catastrófico que llevó al colapso total de la sección elevada. El escenario más probable para la falla involucró la iniciación y propagación de grietas por fatiga en las soldaduras de los pernos en el tramo medio (realizadas sin cumplir con los estándares mínimos), después de algunos años de operación. Estas grietas por fatiga se propagaron llevando a la falla completa de varias soldaduras de los pernos, lo que causó la redistribución de fuerzas de corte dentro de los pernos intactos. Esta redistribución ocasionó un aumento en la tasa de acumulación de daño en los pernos intactos cercanos al tramo medio, resultando en fallas adicionales de los pernos. La falla de los pernos tuvo como resultado una estructura menos rígida, influenciada por las cargas generadas por el paso de trenes que causaron fisuras por fatiga y crecimiento de grietas en las soldaduras entre la Viga T-6 y el marco transversal de contravientos central. Finalmente, el número de pernos que fallaron en el tramo medio fue tal que las tensiones sobre los pernos intactos excedieron la capacidad final de los pernos más débiles en la porción oeste del puente elevado, ocasionando una falla en cascada de los pernos. Este proceso aumentó

DNV

la longitud de la viga no arriostrada por concreto, y finalmente ocasionó inestabilidad y un modo de falla por pandeo, causando el colapso de la sección elevada del puente.

Este reporte detalla los hallazgos del ACR técnico sobre la amenaza de pérdida de integridad en la estructura compuesta elevada. Las barreras entre esta amenaza y el evento mayor, que fue el colapso de la estructura compuesta, fueron identificadas y evaluadas usando la Técnica del Análisis Causal Sistemático basado en Barreras (BSCAT™). Las barreras resumen las causas de raíz técnicas del evento mayor (el accidente). Las causas de raíz técnicas se definen como factores básicos, subyacentes y en un escenario de evento que, si se eliminaran estas causas raíz, se podría haber evitado que ocurriera el accidente.

DNV identificó y evaluó cuatro (4) barreras preventivas para la amenaza de pérdida de la estructura compuesta (falla por esfuerzos cortantes) que, de haber sido efectivas, habrían evitado el colapso del puente elevado. A la conclusión del análisis de barreras, se identificaron recomendaciones basadas en los vacíos o potenciales vacíos en las barreras. Algunas de las debilidades en las barreras comúnmente identificadas se relacionaron con una falta de vigilancia efectiva en varias etapas del proyecto (diseño, construcción y mantenimiento). DNV concluye que la mitigación de la amenaza de pérdida de la estructura compuesta (falla por esfuerzos cortantes) en el caso del Accidente de la L12, no se habría logrado atendiendo sólo una barrera.

A continuación, se presentan las causas de raíz técnicas (es decir, las barreras preventivas que fallaron o que faltaron) del Accidente en la L12. Como parte de la investigación, DNV identificó lecciones aprendidas adicionales que no fueron causales del accidente. Estas lecciones aprendidas adicionales, y las correspondientes recomendaciones se muestran en el Anexo F.

Barrera 1 (Fallida): Diseño conforme a los Estándares AASHTO

Los puentes se diseñan con base en estándares reconocidos por la industria con el fin de asegurar que se incorporen al diseño análisis de ingeniería aceptables y márgenes de seguridad que minimicen el riesgo de falla.

Con base en la revisión de documentos y en los análisis realizados como parte de esta investigación, se encontró que no se cumplieron los siguientes requerimientos AASHTO (refiérase a la Sección 3.3.2): 1) el diseño por fatiga de los pernos, 2) la contra flecha por peso muerto requerido, 3) los elementos de los marcos transversales no se unieron directamente a los patines inferiores de las vigas, 4) los requerimientos de lecho para elementos precolados, 5) la falta de refuerzo de corte de la interfase entre el concreto precolado y el concreto colado en el sitio.

La falla al cumplir con estos requerimientos de AASHTO durante el diseño es una causa de raíz del incidente.

Cristina del Carmen
Perito Traductor
de Inglés autorizado por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:

SG-2020-435A

000306

DNV

Barrera 2 (Faltante): Certificación y Supervisión de las Obras de Ingeniería Civil

Las mejores prácticas de la industria respecto a las obras de ingeniería civil normalmente integran la revisión de las prácticas de construcción por terceras partes.

No se realizó la certificación de las obras de ingeniería civil, como se suele realizar conforme a las mejores prácticas de la industria. Debe observarse que no existen requerimientos regulatorios a nivel regional que establezcan específicamente que se requiere la certificación por un tercero independiente para servicios como el Sistema Metro. Sin embargo, las certificaciones son lugar común para estas estructuras en otras partes del mundo. Adicionalmente, la supervisión de las obras de ingeniería civil del proyecto de la L12 fue llevada a cabo por LYTSA, IAC, EI y DGPM; sin embargo, no se proporcionó a DNV documentación relacionada con la debida diligencia en ingeniería del proyecto por parte de dichas entidades supervisoras y/o no existe.

No se proporcionaron o no existen los registros del seguimiento y cierre de las no conformidades al respecto de que se estaba realizando trabajo fuera de los diseños aprobados, los cuales fueron identificadas por IAC en sus bitácoras de campo.

La falta de certificación de las obras de ingeniería civil, conforme a las mejores prácticas de la industria, y la falta de supervisión respecto a la debida diligencia de la ingeniería del proyecto durante la construcción, son una causa de raíz para la falla.

Barrera 3 (Fallida): Instalación adecuada de pernos conforme a los planos del diseño

Los pernos unen las vigas con la plataforma de concreto para crear una estructura compuesta. La instalación inadecuada de los pernos comprometió la integridad de esta estructura compuesta.

La inspección en campo realizada por personal de DNV sobre los pernos identificó deficiencias significativas en su instalación. Existe evidencia de que no se realizó la inspección visual después de los trabajos de soldado (es decir, los ferrules de cerámica seguían presentes en casi todos los pernos, y debían haber sido removidos para poder inspeccionar visualmente la soldadura).

Con base en fotografías del periodo de instalación, parece que los pernos fueron soldados después de que los paneles de concreto precolado fueron instalados, además limita o imposibilita la realización de inspecciones en la cavidad reducida. De esta evidencia, es claro que los requerimientos en American Welding Society (AWS) D1.1:2002, secciones 7.8.1 Inspección Visual y 7.4.6 Remoción con Arco Protegido, respectivamente, no se siguieron. AWS D1.1:2002 era la normatividad aplicable para la soldadura del perno en el periodo de construcción.

Con base en la inspección visual realizada por DNV, aproximadamente el 30% de los pernos en la sección Oeste o no fueron instalados o se instalaron tan pobremente que no existen indicaciones obvias de una soldadura residual. Los resultados de las pruebas de los pernos intactos en la sección Este exhiben una larga variación y estuvieron significativamente debajo de la capacidad de tensión requerida para el perno, produciéndose la falla de hasta solo un 15.8% de la capacidad requerida.

DNV

La instalación de los pernos no conforme a los estándares durante la construcción es una causa de raíz de la falla.

Barrera 4 (Fallida): Inspección Regular de las Obras de Ingeniería Civil

El manual de mantenimiento de la L12 especifica las inspecciones de rutina (trimestrales, semestrales y anuales, según el año de servicio) e inspecciones posteriores al sismo para los componentes estructurales. Se realizan inspecciones para identificar problemas o áreas de preocupación, para que la intervención y la remediación se realizaran antes de que suceda la falla. DNV no recibió documentación que indicara que se realizaran estas inspecciones de rutina; sin embargo, DNV recibió los reportes de la inspección posteriores al sismo, así como la inspección de ISSA en 2019.

Antes del incidente, las imágenes históricas de Google Street View (2017-2020) y una inspección realizada mediante drones en 2019 del tramo afectado del puente elevado muestran evidencia de deformación y pandeo de los atiesadores longitudinales en las vigas, deflexión vertical negativa de las vigas y deflexión del travesaño central. Además de las deflexiones observadas, la presencia de la eflorescencia del concreto fue consistente con la deflexión de la viga. La inspección de estos componentes debe realizarse anualmente según el manual de mantenimiento L12; sin embargo, no hay evidencia (documentación, datos o de otro tipo) que se haya proporcionado a DNV que indique que se realizaron estas inspecciones de rutina. Se realizaron varias inspecciones posteriores al sismo, pero no destacaron las observaciones de estos aspectos. La evidencia de daño a la estructura, incluido el pandeo en el atiesador longitudinal, la desviación del marco transversal central y la eflorescencia, era visible en fotografías adquiridas desde el nivel de la calle, indicando que el daño habría sido visible mediante una inspección visual que sea consistente con las prácticas típicas de la industria. ISSA realizó evaluaciones e inspecciones de mantenimiento preventivo en 2019, que incluyeron evaluaciones de las columnas, los cimientos de las columnas y las condiciones del suelo; sin embargo, no incluyeron análisis para identificar deformaciones o daños de los elementos estructurales de acero, incluidas las vigas o los marcos transversales. Durante estas evaluaciones de mantenimiento preventivo, no se observaron desplazamientos en las Columnas 12 y 13.

La falla en la realización de las inspecciones al tramo elevado y cumplir con los requerimientos de inspección del manual de mantenimiento es una causa raíz de la falla.

Como se señaló anteriormente, DNV identificó y evaluó cuatro (4) barreras preventivas para la amenaza de pérdida de estructura compuesta (falla por esfuerzos cortantes) que, de ser efectivas, habrían evitado el colapso del tramo elevado. A la conclusión del análisis de barreras, se identificaron recomendaciones basadas en los vacíos o potenciales vacíos en las barreras. Algunas de las deficiencias de las barreras, comúnmente identificadas estaban relacionadas con la falta de supervisión en las distintas etapas del proyecto.

Las recomendaciones aplicables para las cuatro **barreras preventivas** se resumen a continuación.

- Se debe asegurar que revisiones de control de calidad apropiadas existan y se documenten formalmente, y verificar cumplimiento con los estándares aplicables.

Carolina del Carmen
Perito Traductor
de Inglés, español y ruso
del Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro.
SG-2020-4300
000008
Flora
Garcho
Michelle P. Flores

DNV

- Ordenar que los futuros contratos se realicen cumpliendo con las mejores prácticas de la industria. Las mejores prácticas de la industria identifican entidades externas al grupo de construcción que sean responsables del aseguramiento de la calidad y de la certificación de la construcción, incluyendo la instalación de los pernos.
- Revisar el manual de mantenimiento para especificar lo siguiente: (1) aclarar el alcance de cada inspección, (2) aclarar bajo qué escenarios se miden las deflexiones, (3) identificar cómo se debe medir la deflexión para casos de carga muerta y carga viva, (4) identificar un valor para una deflexión descendente inaceptable bajo carga muerta, y (5) identificar a las partes responsables dentro del STC para ejecutar inspecciones y dar seguimiento a las inspecciones
- Realizar inspecciones rutinarias de acuerdo a los requerimientos del manual de mantenimiento.
- Si se realizaron inspecciones, realizar una revisión profunda para determinar por qué no se observaron estas áreas de deflexión y deformación. Lo anterior debería incluir una evaluación de las técnicas actuales de inspección, frecuencia y control de calidad, de conformidad con las mejores prácticas de la industria.

[Handwritten signature]
[Handwritten initials]
Cristina del Carmen
Perita Traductor
de Inglés autorizada por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:
SG-2020-435A
Flores García Luna IX
[Handwritten signature] 000009